



TU Clausthal

Fakultät für Natur- und
Materialwissenschaften

Dissertation

Holger Fritsche

Untersuchungen zur
pneumatischen Förderung von
Kohlenstaub zum Einblasen in
den Hochofen unter besonderer
Berücksichtigung instabiler
Förderzustände

Institut für Metallurgie
2012

Untersuchungen zur pneumatischen Förderung von Kohlenstaub zum Einblasen in den Hochofen unter besonderer Berücksichtigung instabiler Förderzustände

D i s s e r t a t i o n

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Holger Fritsche
aus Oberhausen (Rhld.)

genehmigt von der

Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung
15.03.2013

Vorsitzende/Vorsitzender der Promotionskommission:

Univ.-Prof. Dr. Diethelm Johannsmann

Hauptberichterstatter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Spitzer

Mitberichterstatter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Brenner

Prof. Dr.-Ing. Karl-Hermann Tacke

Die Arbeit wurde am Institut für Metallurgie der TU Clausthal angefertigt.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Metallurgische Prozesstechnik des Instituts für Metallurgie an der Technischen Universität Clausthal.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Spitzer für die Anregung zu diesem hochinteressanten Thema, die wohlwollende Unterstützung und das stete Interesse am Verlauf dieser Arbeit. Die vielfältigen praktischen Ratschläge und hilfreichen Diskussionen waren für mich wertvoll und gaben mir Anregungen für die Durchführung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl-Hermann Tacke von der AG der Dillinger Hüttenwerke danke ich für die Bereitstellung dieses Themas.

Jeder Besuch in Dillingen war eine Quelle neuer Motivation, Ideen und Freude. Die fürsorgliche Betreuung und ausgeglichene Atmosphäre ermöglichten eine sehr angenehme Zusammenarbeit. Dadurch gelang es, die Arbeit zielführend zu bearbeiten.

Viele wertvolle Ideen entwickelten sich aus den anregenden Gesprächen in Dillingen mit Herrn Dr. Lin und Herrn Dr. Feiterna, denen ich auch für die freundliche Unterstützung während der Promotion herzlich danke.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunter Brenner vom Institut für Technische Mechanik, möchte ich für die bereitwillige Übernahme des Koreferats und das große Interesse an dieser Arbeit danken.

Herrn Dr. rer. nat. Jens Wendelstorf, Institut für Metallurgische Prozesstechnik an der TU Clausthal, danke ich für die anregenden Diskussionen während meiner Zeit am Institut.

Danken möchte ich weiterhin allen Mitarbeitern des Instituts für ihre kollegiale und entgegenkommende Zusammenarbeit. Mein Dank gilt ebenso den Mitarbeitern in der Technik, die mir durch ihre Unterstützung sehr bei der Umsetzung im Anlagen- und Versuchsaufbau geholfen haben.

Frau Dipl.-Ing. (FH) Alexandra Herrmann danke ich für die hilfreiche Zusammenarbeit bei der Generierung der Mess- und Regelungstechnik und dem Programmieren unter LabView 7.1. während der Versuchsreihen im Rahmen Ihrer Diplomarbeit.

Weiterhin möchte ich den vielen Firmen danken, die durch ihren Einsatz und Hilfsbereitschaft, sowie teilweise großzügigen Sachspenden mit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Allen anderen hier nicht namentlich erwähnten Mitarbeitern des Instituts, Freunden und Kollegen gilt mein Dank für die vielen Beiträge, die anregenden Diskussionen und die vielen kleinen und großen Hilfen, die diese Arbeit erweitert, verbessert und anschaulich gemacht haben.

Kurzfassung

Durch das direkte Einblasen von Kohlenstaub in den Hochofen ist es möglich, den Anteil an zugeführtem Koks zu reduzieren. Hierbei wird die Kohle zuvor gemahlen und über ein pneumatisches Fördersystem den Blasformen zugeführt, mittels derer der Kohlenstaub in den Hochofen eingeblasen wird. Neben einer Steigerung der Leistung des Hochofens lässt sich zudem eine Kosteneinsparung erzielen, die für den Betreiber von großem Interesse ist.

Anlass für dieses Projekt war das Bestreben, die von der Dillinger Hütte betriebenen Kohleeinblasanlagen zu optimieren und Untersuchungen aufgrund der beobachteten Instabilitäten beim Fördern durchzuführen. Durch diese Pulsationen ist eine unvollständige Verbrennung einhergehend mit einer Einlagerung verkokter Kohlepartikel im toten Mann denkbar. Dies führt zu einer Erhöhung des Strömungswiderstandes in der Schüttung.

Eine Steigerung der Einblasrate bei unveränderten Förderbedingungen dürfte das Problem an dieser Stelle noch erhöhen und die angestrebte Leistungssteigerung des Hochofens herabsetzen. Zur Untersuchung der Problemstellung wurde ein Versuchsaufbau, der in speziellen Punkten den Bedingungen am Hochofen der AG der Dillinger Hüttenwerke entspricht, entwickelt und erstellt. Somit ist es möglich, die verschiedenen Förderzustände zu vergleichen und zu charakterisieren. Beim pneumatischen Fördern von Quarzsand als Modellschüttung wurden die Transportzustände (Dünnstromförderung, Segregationsbildung verbunden mit pulsierendem Einblasen und die Dichtstromförderung) in Abhängigkeit der verschiedenen Parameter ermittelt und in Form eines geeigneten Zustandssystems dargestellt. Auf der Grundlage dieses Zustandssystems ist es möglich technische Modifikationen für industrielle Anwendungen abzuleiten.

Abstract

The direct injection of pulverized coal into the blast furnace provides a possibility to reduce the amount of coke. In this case, the coal is ground and supplied by a pneumatic conveying system to the tuyers where the pulverized coal is injected into the blast furnace. In addition to an increase of the productivity of the blast furnace, a cost advantage would be obtained which is very important for the company.

The background of this project was to optimize the coal injection system at Dillinger Hütte and to reduce the instability observed during the injection of pulverized coal through the pneumatic conveying system. An incomplete combustion of pulverized coal could be a result of this pulsation which is accompanied by a collection of unburned coal particles in the area of the dead man. This would lead to an increase of flow resistance in the blast furnace.

An increase of the coal injection rate without optimization of conveying conditions should enhance the issue and lead to a reduction of the performance of blast furnace. To investigate this problem, a pilot plant was designed and built at TU-Clausthal which simulates in special aspects the conditions of the blast furnace at the Dillinger Hütte. In this way, it was possible to compare and characterize different conveying states. The dependency of different conveying states (dilute phase conveying, segregation forming associated by pulsative blowing in and dense phase conveying) on the pneumatic conveying parameters was determined. In this case, silica sand was used as a modelling substance. The several dependencies were illustrated in the form of state diagrams. Based on these state diagrams, it is possible to develop technical modifications for industrial applications.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und technisch wissenschaftliche Problemstellung	1
1.1	Hintergrund zur Optimierung des Kohleeinblasens.....	1
1.2	Problemstellung.....	2
1.3	Zielsetzung.....	2
1.4	Aufgabenstellung.....	3
2	Stand der Technik.....	5
2.1	Pneumatische Förderung.....	7
2.1.1	Vergleich Dichtstrom- zur Dünnstromförderung.....	10
2.1.2	Theoretische Betrachtung zum Förderzustandsdiagramm für die Dicht- und Dünnstromförderung	12
2.2	Kornformkennzahlen des Fördergutes	21
3	Mathematisches Modell zur pneumatischen Strählen- und Pfropfenförderung	23
4	Versuchsaufbau	27
4.1	Wahl des Förderstreckenverlaufs, des Fördergutes und des Förderstreckenmaterials	27
4.2	Beschreibung der Pilotanlage	28
4.3	Regelung, Steuerung und Datenerfassung	34
4.4	Messtechnik des experimentellen Aufbaus	37
4.4.1	Funktionsweise Massendurchflussmesser für Luft.....	39
4.4.2	Druckmessumformer	41
4.4.3	Aufbau und Funktion der Licht-Spannungswandler	44
4.4.4	Aufbau und Funktion der Dehnungsmessstreifen	47
4.4.5	Wägezelle	50
4.4.6	Versuchsaufbau Verschleißmessungen.....	52
5	Beschreibung des Fördergutes	53
5.1	Zusammensetzung des Fördergutes.....	53
5.1.1	Röntgendiffraktometermessungen	53
5.1.2	Quantitative chemische Analyse.....	57
5.2	Physikalische Eigenschaften des Fördergutes	58
5.3	Partikeleigenschaften des Fördergutes.....	59
5.3.1	Mikroskopische Betrachtungen	59
5.3.2	Korngrößen- und Kornformanalyse mittels Laserdiffraktometer	62
5.4	Übersicht der Fördergutdaten und -befunde	68
6	Versuchsdurchführung	69
6.1	Beschreibung einer Punktmessung.....	70
6.1.1	Umgebungsparameter einer Punktmessung und ihre Genauigkeiten	72

6.2	Messungen zur Darstellung eines Förderzustandsdiagramms.....	73
6.2.1	Berechnung des Fördergutmassenstroms.....	73
6.2.2	Berechnung der auf die Förderstreckenlänge bezogenen Druckdifferenz	75
6.2.3	Berechnung der Förderluftdichte.....	75
6.2.4	Berechnung der Leerrohrgeschwindigkeit	76
6.2.5	Berechnung der Beladung	77
6.2.6	Abgeleitete Größen einer Punktmessung zur Darstellung im Förderzustandsdiagramm und ihre Genauigkeiten	77
6.3	Modellberechnungen zur Darstellung des Förderzustandsdiagramms ..	78
6.4	Verschleißmessungen.....	82
6.4.1	Wägung der Cu-Rohre.....	83
6.4.2	Berechnung des punktuellen Cu-Rohr-Verschleißes	83
6.4.3	Berechnung der Cu-Rohr-Verschleißfläche	84
7	Darstellung und Diskussion der experimentellen Ergebnisse.....	85
7.1	Beschreibung der Förderzustände Ballen- und Strähnenförderung	85
7.1.1	Korrelationen der Sensordaten mit dem Förderzustand	85
7.1.2	Betrachtung der Pulsationen bei verschiedenen Förderzuständen...	92
7.2	Betrachtungen zum Förderzustandsdiagramm	98
7.2.1	Experimentell erstellte Förderzustandsdiagramme.....	98
7.2.2	Gegenüberstellung von Experiment und mathematischem Modell im Förderzustandsdiagramm	104
7.3	Förderleitungsvererschleiß an 90° Cu-Krümmern.....	107
7.3.1	Unsicherheiten der Verschleißmessungen	111
8	Schlussfolgerungen und Diskussion	115
9	Zusammenfassung	117
	Literatur- und Quellenverzeichnis	119
	Abbildungsverzeichnis.....	127
	Tabellenverzeichnis	131
	Anhang.....	133
A	V Versuchsergebnisse zur statistischen Auswertung der Korngrößenanalyse.....	134
B	Experimentelle Ergebnisse.....	140

1 Einleitung und technisch wissenschaftliche Problemstellung

In der Vergangenheit wurde der für die Produktion von Roheisen nötige Koks z.B. aus Polen oder China importiert. Diese Staaten haben sich zu Industriestaaten entwickelt, mit all dem Bedarf an Energie und Rohstoffen wie die Industrienationen der restlichen Welt, weshalb die Rohstoffe und hier speziell der Koks von den Ländern selbst benötigt wird. Da aus diesem Grund auf dem Rohstoffmarkt eine Verknappung aller Ressourcen zu verzeichnen ist und sich hieraus ein deutlicher Anstieg der Kokspreise ergibt, ist die Verwendung von Kohlenstaub ein sinnvoller Beitrag, die Roheisenkosten zu senken, [Gud85].

Durch den Einsatz der kostengünstigeren Variante Kohlenstaub kann ein Teil der sonst üblicherweise verwendeten Rohstoffe wie Schweröl bzw. Koks ersetzt werden [Yan85]. Durch diesen Minderverbrauch an Öl bzw. Koks lassen sich die Erzeugungskosten pro Tonne Roheisen reduzieren. Durch das eingesparte Kapital rechnet sich die Investition in die Anlage. Je höher die Kokspreise steigen, desto eher ist der Return on Investment zu erwarten.

1.1 Hintergrund zur Optimierung des Kohleeinblasens

Das Einblasen von Kohlenstaub in den Hochofen ist eine dem Stand der Technik entsprechende zusätzliche Brennstoffzugabe. Dieses Direkteinblasen von Kohlenstaub gehört zu den besten verfügbaren Techniken (BVT) für Hochöfen nach [Von01].

Hierfür verwendet die AG der Dillinger Hüttenwerke speziell, ihren Bedürfnissen entsprechend, eine pneumatische Kohlenstaubzugabe. Dieser Kohlenstaub wird in reproduzierbarer, gleich bleibender Qualität aus Kohle selbst gemahlen, um in kontinuierlicher Mengenzuführung in den Hochofen eingeblasen zu werden.

Dieses Einblasen von Kohlenstaub in den Hochofen ist nach [IPP01] geeignet, den Koksanteil zu vermindern und ermöglicht dadurch eine deutlich wirtschaftlichere Produktion des Roheisens [Koe86]. Darüber hinaus lässt sich die Leistung des Hochofens steigern [Cap88]. Bei der AG der Dillinger Hüttenwerke wird dieser Kohlenstaub in die s. g. Rast des Hochofens über Blasformen pneumatisch eingebracht. Andere Hochofenbetriebe setzen anstelle der gemahlenen Kohle sowohl Kohle in granulierter Form als auch andere Kohlenwasserstoffquellen wie Schweröl, Rückstände aus der Öl- und Kunststoffindustrie, Erdgas, sowie Verpackungsmaterial des Dualen Systems Deutschland GmbH ein.

Um einen störungsfreien Hochofenbetrieb zu gewährleisten ist darauf zu achten, dass der Koks nicht vollständig durch andere Energieträger ersetzt werden kann [Cap90]. Der Koks dient hierbei als Stützgerüst und ist somit verantwortlich für eine optimale Durchgasung der Einsatzstoffe im Hochofen, vom Gestell bis hinauf in die Hochofengicht. Durch den verminderten Einsatz des Kokes ergeben sich Reduzierungen der Emissionen, die bei der Herstellung des Kokes entstehen. Nach [IPP01] entspricht 1kg eingeblasener Kohle ca. 0,85 bis 0,95kg Koks.

1.2 Problemstellung

Voraussetzung für das pneumatische Einblasen von Kohlenstaub ist die kontinuierliche Förderung in die Blasformen unter der Voraussetzung einer höchstmöglichen und konstanten Förderrate [Gut78, Sch85]. Pulsationen, die aufgrund von instationären Massenströmen entstehen, können eine negative Wirkung auf die Verbrennungskinetik des Kohlenpulvers in den Wirbelzonen mit sich führen. Die Kohleeinblasanlagen der Hochöfen der Dillinger Hüttenwerke AG lassen bei der Betrachtung durch die Schaugläser der Düsenstöcke an einigen Blasformen Pulsationen erkennen [Mey03].

Um das Einblasen in den Hochofen bezüglich der eingesetzten Kohlemengen, Kohlesorten und Windparameter flexibel nutzen zu können, ist eine bestmögliche Nutzung der pneumatischen Fördertechnik Voraussetzung [Kru98]. Unter den gegenwärtigen Förderbedingungen bilden sich Pfropfen des Fördergutes aus, die zu einem pulsierenden Einbringen des Kohlenstaubs führen können. Dies ist Basis einer diskontinuierlichen Verbrennung einhergehend mit einem Einlagern verkokter Kohlepartikel im Bereich des „toten Mann“. Zusätzlich tritt eine Erhöhung des Strömungswiderstandes der Schüttung auf.

Im Ist-Zustand der Hochofenanlage der Dillinger Hütte treten im pneumatischen Förderprozess für die Kohlenstaubzugabe Pulsationen auf, [Mey03]. Die Pulsationen entstehen während des Einblasens und nehmen bei Erhöhung der Förderrate des Fördergases zu, wenn der Kohlenstaub zunächst in großen Ballen und hiernach in kleineren Pfropfen gefördert wird. Diese Pulsationen nehmen im Weiteren ab bei erneuter Erhöhung der Fördergasrate [Ost63]. Dies ist der Fall, wenn die Förderung aus dem Dichtstrombereich der Ballenförderung in die Strähnenförderung übergeht.

1.3 Zielsetzung

Diese Problematik kann verhindert werden durch die Einstellung kontinuierlicher Förderbedingungen in Form nicht pulsierender Massenströme des Kohlenstaubes mit einer hierauf abgestimmten Fördergasrate. Dies würde dem Förderzustand der Strähnenförderung entsprechen. Dem tatsächlich erreichbaren Maximum des Hochofenausbringens liegen sowohl thermodynamische Aspekte des Hochofenprozesses, als auch eine kontinuierliche Beladung der pneumatischen Förderung zugrunde [Wei06].

Das Interesse liegt hierbei darin, möglichst viel Kohlenstaub pro Zeiteinheit zu fördern, bei einem gleichzeitig möglichst geringen Anteil an Fördergas als Fördermedium und minimalen Verschleiß der Förderleitungen sowie der Blasformen.

1.4 Aufgabenstellung

Bestandteil der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung und der Aufbau einer Pilotförderanlage zum pneumatischen Transport von Stäuben bzw. Sand. Dabei sollte die Prozesssicherheit der Anlage für den pneumatischen Förderbetrieb gewährleistet werden. Das System dieser Anlage, bestehend aus Förderstrecke, Fördergut und Fördermedium, soll möglichst weitgehend den Bedingungen am Hochofen entsprechen (s. Prozessschema in Abbildung 4.4-1). Als Modellsubstanz für das Fördergut Kohlenstaub wird wegen der möglichen Explosionsgefahr des Kohlenstaubes, die sonst erheblichen zusätzlichen technischen Aufwand bedingen würde, Quarzsand verwendet. Die pneumatische Förderung ist in den Förderzuständen der Dünnstromförderung, der Segregationsbildung verbunden mit pulsierendem Einblasen und der Dichtstromförderung durchzuführen. Die hierbei ermittelten Werte sind in einem geeigneten übertragbaren Förderzustandsdiagramm darzustellen. Hierbei sind vorab zu beschreibende Parameter zu variieren, so dass auf der Grundlage des hiermit ermittelten Förderzustandsdiagramms eine Auswahl geeigneter Prozessparameter möglich wird. Besondere Berücksichtigung findet dabei die Wahl der optimalen Förderung, wobei der Fokus auf der Dichtstromförderung liegt. Des Weiteren soll der auftretende Verschleiß der Förderleitung Beachtung finden.

Mögliche Einflussparameter sind

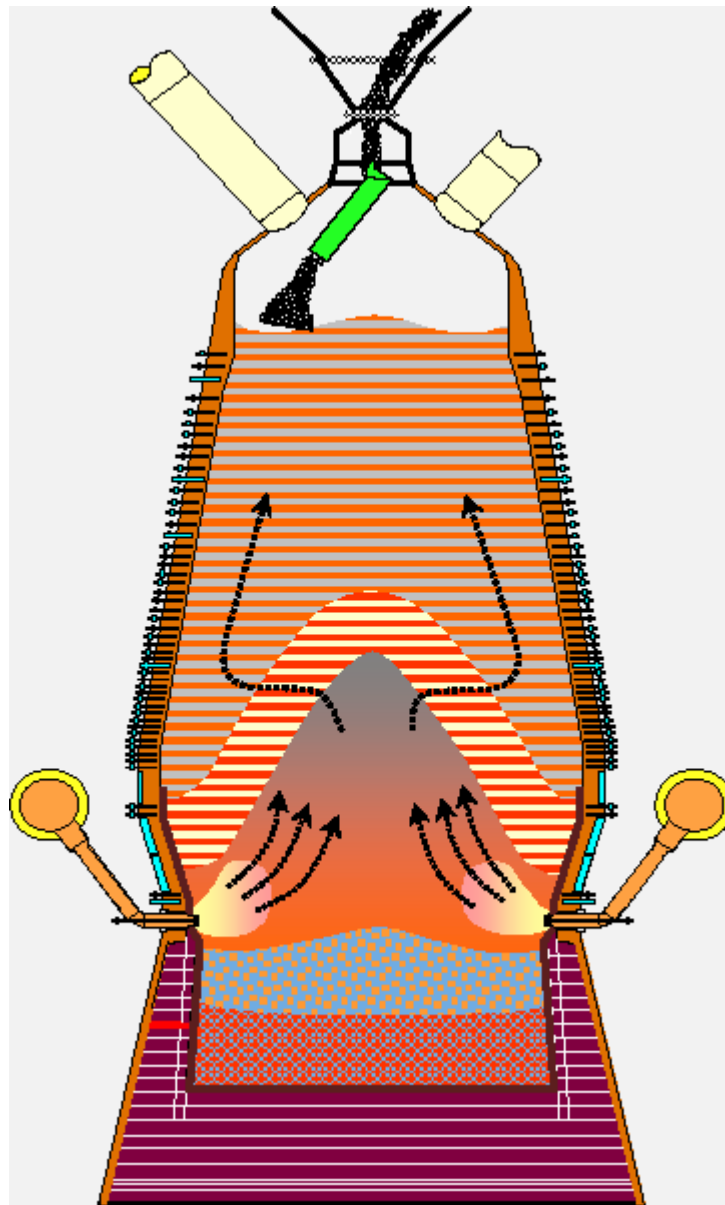
- Gasstrom durch die Leitung
- Feststoffstrom
- Druckgradient
- Druckniveau
- Leitungsführung (horizontale, vertikale Abschnitte, Bögen)
- Partikelform, Partikelgröße

Technische Maßnahmen zur Optimierung der Förderbedingungen sollen für die Pilotanlage umgesetzt und getestet werden.

Der Umbau hin zur Dichtstromförderung beinhaltete eine Optimierung des Injektors, bei der ein größerer Leitungsquerschnitt gewählt wurde, sowie eine geänderte Führung des Bypasses mit dem Ziel einer homogenen Fördergut-Fördergas-Durchmischung, siehe Abbildung 4.2-2. Ebenfalls wurde der Druckbehälter mit einer zusätzlichen Fördergaszuführung ausgestattet, welche ein kontinuierliches Nachfließen des Fördergutes auch im Bereich der Dichtstromförderung gewährleistet.

2 Stand der Technik

Bei der Herstellung von Roheisen im Hochofen dient Koks zum einen als Energielieferant und zum anderen als Reduktionsmittel. Der heutige Stand der Technik ersetzt den Koks zum Teil durch Kohlenstaub. Das Verfahren des pneumatischen Kohleeinblasens ermöglicht die Roheisenproduktion bei modernen Hochöfen bei einem geringeren Einsatz an Koks gemäß [IFC12] in Abbildung 2-1.



Blasform zum
Einblasen von
Kohlenstaub

Abbildung 2-1: Schema des Hochofenprozesses nach [IFC12]

Das Bestreben der Anlagenbetreiber ist die Erhöhung der Kohleeinblasraten, die zu einer Verringerung des Einsatzes von Koks führen. Das pneumatische Einblasen von Kohlenstaub in den Hochofen gehört deshalb zu den Anwendungen mit den größten Zuwachsraten in der Stahlindustrie. Das Mahlen der Kohle zu Kohlenstaub führt zu einer Vergrößerung der Reaktionsoberfläche. Durch das Verfahren des Einblasens des Kohlenstaubes in den Hochofen, siehe Abbildung 2-1, werden die Produktivität und der Wirkungsgrad heraufgesetzt. Bei diesem Verfahren muss bei Erhöhung der Kohlenstaubeinblasraten beachtet werden, dass der Kohlenstoff

im Verwirbelungsbereich möglichst vollständig verbrennt. Eine unvollständige Verbrennung führt zur Anreicherung staubförmiger Verbrennungsrückstände im Hochofen und in den Filtern. Dies behindert das Abströmen der heißen Gase [Pau99].

Der Hochofen der Dillinger Hütte wird nach [Mey03] mit Massenströmen des Fördergutes Kohlenstaub von 700 bis 900 kg/h pro Blasform beschickt. Der zugehörige Fördergasmassenstrom des Fördermediums Luft liegt zwischen 0,02 bis 0,03 kg/s . Als weiterer Betriebsparameter des Hochofens der Dillinger Hütte wird ein Druck der Förderluft an den Einblasleitungen von 4 bis 5 bar angegeben. Zur Korngrößenverteilung existiert lediglich die Abschätzung, dass 70% der Kohlepartikel kleiner als 90 μm sind. Mit den vorliegenden Angaben ist ein Betrieb der pneumatischen Kohlenstaubeinblasanlage des Hochofens der Dillinger Hütte im Bereich der Strähnen- oder Ballenförderung wahrscheinlich.

2.1 Pneumatische Förderung

Unter pneumatischer Förderung ist der Transport von Schüttgütern zu verstehen, die mit einer Gasströmung durch Rohrleitungen gefördert werden. In pneumatischen Förderanlagen können staubförmige und granulare Schüttgüter transportiert werden [Dub07]. Dies geschieht mittels Gebläsen oder Verdichtern. Hierbei werden Saug- und Druckförderanlagen unterschieden. Pneumatische Förderanlagen verfügen häufig über einen Druckbehälter, in dem das Schüttgut unter Zugabe des Fördergases fluidisiert wird. Auch die pneumatische Zugabe des Hochofens der AG der Dillinger Hüttenwerke transportiert das Kohlepulver auf diese Weise. Hier findet Stickstoff als Fördermedium durch das Rohrleitungssystem seinen Einsatz.

Die Partikelbewegung eines Fluids verläuft in der Regel ungeordnet. Sobald das Fluid strömt, ist den potentiellen Bewegungen der Moleküle eine Komponente in die generelle Strömungsrichtung überlagert [Sti09]. Trifft ein Partikel während des Transports an die Rohrwandung, so verliert es dabei drastisch an Geschwindigkeit. Es ist offensichtlich, dass die mittlere Strömungsgeschwindigkeit nahe der Wand gegen Null geht, siehe Abbildung 2.1-2. Von der gegenüberliegenden Rohrwand geht eine analoge Wirkung aus. Mit jeder weiteren Kollision wird die Bewegung in Strömungsrichtung weiter herabgesetzt bei gleichzeitiger Zunahme der Querströmung. Hiermit ist die Ausbildung eines Strömungswiderstandes erklärbar. In Abbildung 2.1-1 A modelliert [Eve07] theoretisch diese Partikelbewegung.

Bei Betrachtung der Strähnenförderung an der Versuchsanlage ist in Abbildung 2.1.1-2 zu erkennen, dass sich die Quarzsandsträhne mit ihren Partikeln nicht linear, sondern stets spiralförmig bewegt, wie auch Abbildung 2.1-1 B verdeutlicht. Legt man nach [Eve07] die Kanten einer Gittermatte ähnlich einer Stufenversetzung versetzt an und formt diese Matte zu einer Röhre, lassen sich die jeweils innen liegenden, in Strömungsrichtung weisenden gekrümmten Bahnen leicht erkennen, Abbildung 2.1-1 C. Diese sog. Drallströmung führt zu einer ständigen Umlenkung der Partikel und bewirkt die Reibung an der Förderleitungsinnenwand [Kra04]. Die hieraus resultierende Druckkomponente steht senkrecht zur Strömungsrichtung. Bei gekrümmt verlaufenden Förderleitungen wird das Fördergut ständig von der Förderleitungsinnenwand zurück auf die o. g. Spiralbahn geworfen. Das Fördergut wird dabei stets in die gleiche Richtung gefördert, woraus sich eine geordnete Bewegungsstruktur ergibt. Somit sind Kollisionen innerhalb dieses Massenstromes relativ wenig ausgeprägt und die Partikel können relativ dicht beieinander fließen. Der Druck innerhalb des Systems ist immer nach innen und gleichzeitig in Förderrichtung gerichtet. Dies generiert eine Beschleunigung der inneren Strömungslinien, siehe auch Abbildung 2.1-2, die einem Potentialwirbel entspricht. Dieser Potentialwirbel kann sich nur nachhaltig ausbilden, wenn zeitgleich eine Bewegung in axialer Richtung möglich ist. Fluide bewegen sich somit auf spiralförmigen oder ein- und ausrollenden Bahnen. Diese Bewegungsform stellt in der Fördertechnik den geringsten Widerstand dar. Zudem wirkt diese Art der Förderung selbststabilisierend auf das zu bewegende Fördergut [Fra02].

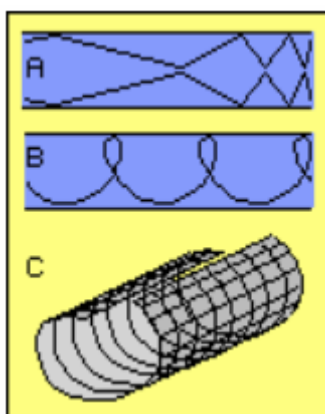


Abbildung 2.1-1: Partikelbewegungen in Leitungen nach [Eve07]

Unter Zugrundelegung des Modells der potentiellen Partikelbewegung lassen sich nach [Was98] folgende Phänomene der mit Partikeln beladenen Fluidströmung in Rohren beschreiben

- Ausbildung der Grenzschicht
- Abreißen, Wirbelbildung
- Turbulente Strömung
- Reibung proportional zur Länge
- Reibung umgekehrt proportional zum Durchmesser des Rohres

Bei der Betrachtung der Transportvorgänge im Rohrleitungssystem während des pneumatischen Förderns sind Stöße der einzelnen Fördergut-Partikel gegeneinander oder gegen die Rohrrinnenwand der Förderleitung zu erkennen, Abbildung 2.1-2.

Nach [Kus04] ist die Stosszahl S_z beim Partikel-Wand-Stoss mit Gleichung (2.1.1) beschreibbar

$$S_z = \left| \frac{v_{\text{Partikel,nach}}}{v_{\text{Partikel,vor}}} \right| \quad (2.1.1)$$

mit:

S_z = Stosszahl

$v_{\text{Partikel,nach}}$ = Partikelgeschwindigkeit nach dem Stoss in m/s

$v_{\text{Partikel,vor}}$ = Partikelgeschwindigkeit vor dem Stoss in m/s

Die Stosszahl zwischen bewegtem Partikel und der Wand wird für Simulationen und Modellrechnungen häufig vereinfachend als 1 zugrunde gelegt [Lot02]. Während die Stöße die Fördergutpartikel abbremsen, bewirkt die Gasströmung im System eine erneute Beschleunigung der Partikel nach [Mus59]. Die hierfür benötigte Energie stammt aus der Gasströmung, die über die Gesamtstreckenlänge einen Druckabfall erfährt. Diese Betrachtung gilt allgemein, unabhängig davon, ob sich einzelne Partikel frei durch die Förderleitung bewegen oder ob ein Ballen bestehend aus vielen einzelnen Partikeln durch das Rohr geschoben wird [Sag07].

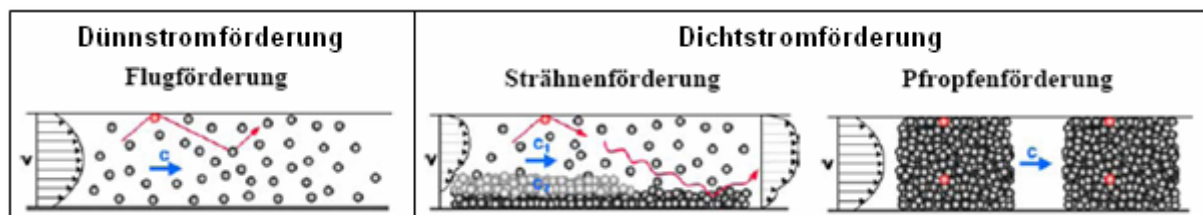


Abbildung 2.1-2: Unterteilung der Förderzustände [Nie06]

Daraus resultieren nach [Nie06] zwei Möglichkeiten der pneumatischen Förderung gemäß Abbildung 2.1-2

- Dünnstromförderung
- Dichtstromförderung

Die Dichtstromförderung ist weiterhin in die Förderzustände Pfropfenförderung [Leg81] und dem Übergangszustand der Strähnenförderung unterteilbar.

Gemäß [Eve07] können bei der in Abbildung 2.1-2 dargestellten Flugförderung die Einzelpartikel auch Bewegungen lotrecht zur bevorzugten Vorwärtsbewegung ausführen. Die Pfropfenförderung erlaubt, wie in Abbildung 2.1-2 erkennbar, keine Bewegungsmöglichkeit, die nicht mit der

Gesamtbewegung des Pfropfens übereinstimmt. So ist die Bewegung der Partikel seitlich durch die Nachbarpartikel begrenzt und somit durch den Verlauf des Leitungssystems in Förderrichtung vorgegeben [Goe06]. Hierbei ist c die örtliche Geschwindigkeit, mit der sich die einzelnen Partikel durch das Förderleitungssystem bewegen und v_0 beschreibt den Mittelwert der axialen Luftgeschwindigkeit, die sich auf den freien Förderleitungsquerschnitt bezieht [Mül07].

Kennzeichnend für die Dünnstromförderung ist eine gleichmäßige Verteilung der Fördergutpartikel über den Förderleitungsquerschnitt in Verbindung mit einer niedrigen Fördergutkonzentration, sowie einer hohen Fördergasgeschwindigkeit, Abbildung 2.1-2 links.

Beim Wechsel des Förderzustands durch Änderung von v_0 , wird ab einem bestimmten Bereich der Luftgeschwindigkeiten und der Drücke die Förderung instationär [Wer04].

Bei der Dichtstromförderung kommt es nach [Wel62] bei einer Herabsetzung der Fördergasgeschwindigkeit zunächst zu einer Segregationsbildung, in der sich das Fördergas und das Fördergut trennen und sich eine Zweiphasenströmung ausbildet, Abbildung 2.1-2 mitte. Der während einer Versuchsreihe ermittelte Förderzustand der Strähnenförderung ist in Abbildung 2.1.1-2 exemplarisch dargestellt.

Nach einer weiteren Reduzierung der Fördergeschwindigkeit segregiert der Feststoff aus dem Fördermedium und ein hoher Füllungsgrad der Förderleitung wird erreicht. Es ergibt sich als instabiler Förderzustand die Pfropfenförderung, die den wichtigsten Förderzustand im Bereich der Dichtstromförderung darstellt siehe Abbildung 2.1-2 rechts und Abbildung 2.1.1-1 [Pah93].

Aufgrund ihrer niedrigen Fördergeschwindigkeit transportieren Dichtstromfördersysteme das Fördergut sehr schonend. Einsatz finden sie daher bei empfindlichen, zerbrechlichen oder abrasiven Schüttgütern.

2.1.1 Vergleich Dichtstrom- zur Dünnstromförderung

Werden die unterschiedlichen Förderzustände einander gegenübergestellt, ergeben sich folgende Vor- und Nachteile.

Vorteile der Pfpfenförderung

- Höhere Beladungen mit $\mu > 30$, siehe Gleichung (2.1.2.1)
- Geringe Fördergeschwindigkeit d.h. verminderte Abrasion durch den Kohlestaub
- Geringerer Verschleiß der Förderleitungen (Rohrinnenwand- und Krümmerverschleiß)
- Verminderter Fördergasbedarf
- Energieeinsparung gegenüber Dünnstromförderung bei gleichem Versorgungsdruck

Nachteile der Pfpfenförderung

- Gefahr der stehenden Säule (Stopfgrenze)
- Höherer Druckabfall über Förderstreckenlänge
- Leistungstärkere Gebläse bzw. Verdichter notwendig
- Pulsationen
- Niedrigere Förderleistung als im Dünnstrombereich

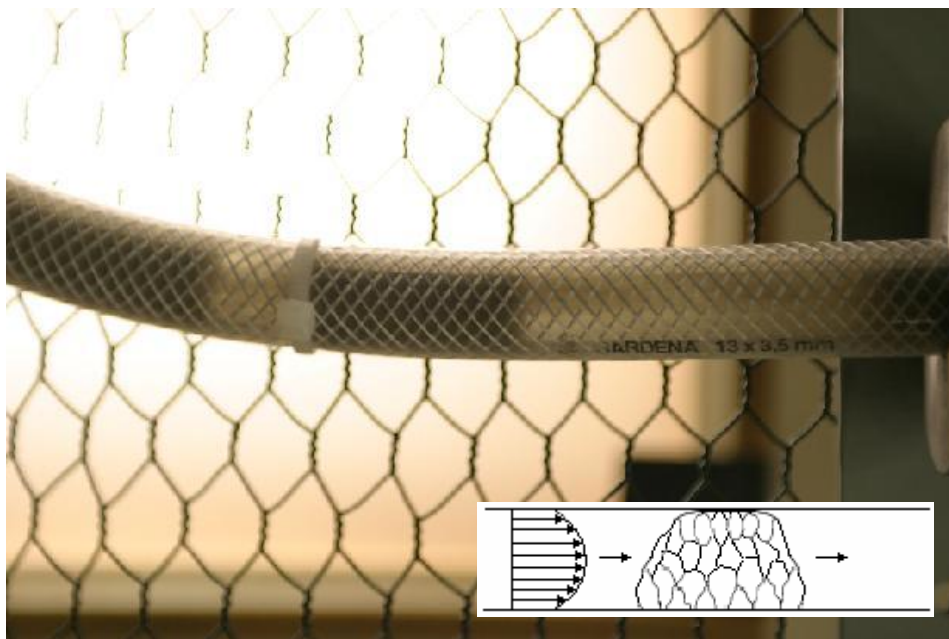


Abbildung 2.1.1-1: Förderzustand Pfpfenförderung real und schematisch

Vorteile der Dünnstromförderung

- Geringerer Fördergasdruck
- Leistungsschwächere Auslegung des Verdichters
- Keine Gefahr des Erreichens der Stopfgrenze
- Höhere Förderleistung im Dünnstrombereich möglich
- Keine Pulsationen während der Dünnstromförderung

Nachteile der Dünnstromförderung

- Hoher Verschleiß von Förderstrecke
- Hoher Verschleiß von Fördergut
- Erhöhter Fördergasbedarf

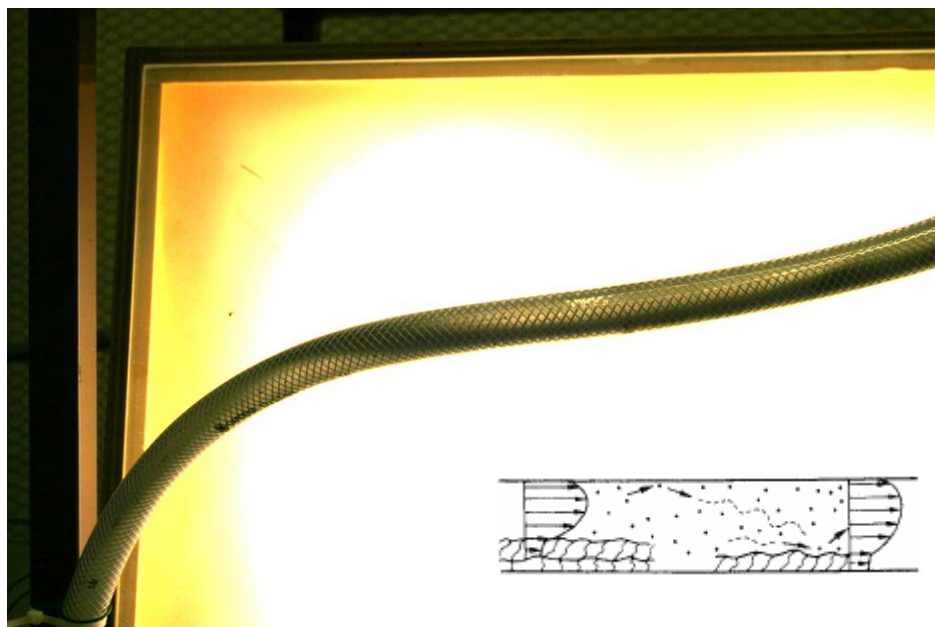


Abbildung 2.1.1-2: Förderzustand Strähnenförderung real und nach [VDI02]

Bei der Betrachtung verschiedener Förderzustände fällt die Strähnenförderung in den Übergangsbereich zur Dünnstromförderung. Bei Strähnenförderung zeigt Abbildung 2.1.1-2, dass die lokalen Pulsationen des Fördergutmassenstroms bzw. der Beladung nicht in der Form ausgeprägt sind, wie dies bei der Pfropfenförderung der Fall ist. Die beschriebenen Nachteile der Pfropfen- und Dünnstromförderung sind bei der Strähnenförderung nicht in dem Umfang ausgeprägt.

Während des Hochofenprozesses ist bei hohen Kohlenstaub-Beladungen aufgrund unvollständiger Verbrennung das Auftreten verkokter Bestandteile im „toten Mann“ zu erwarten. Im Weiteren betrachten wir eine theoretische Kohlenstaub-Beladung mit einem höheren Fördergasanteil, bei der noch eine vollständige Verbrennung im Hochofenprozess angenommen werden kann. Nach dem heutigen Stand der Technik ist nach [Loe05] hierfür ein höherer Fördergasanteil bereitzustellen. Unter Beibehaltung dieser theoretischen Beladung erfolgt nun eine theoretische Variation des Förderzustandes im Dichtstrombereich. Im Förderzustand der Pfropfenförderung ist das Pulsieren der Beladungswerte zu erwarten. Hierdurch ist ebenfalls eine Bildung verkokter Bestandteile im „toten Mann“ aufgrund einer zeitweise zu hohen Kohlenstaub-Beladung denkbar. Außerdem ist das Erreichen der Stopfgrenze und damit der Anlagenausfall denkbar. Bei Dünnstromförderung derselben optimalen Beladung ist aufgrund eines deutlich erhöhten Verschleißes der Förderleitung ebenfalls ein Anlagenausfall wahrscheinlich [Sur07]. Aufgrund der Nachteile der Pfropfenförderung in Bezug auf verkokte Bestandteile im „toten Mann“ bzw. aufgrund einer höheren Wahrscheinlichkeit bezüglich eines Anlagenausfalls bei Pfropfen- oder Dünnstromförderung, liegt der Fokus dieser Arbeit im Folgenden auf der pneumatischen Zugabe des Kohlenstaubes im Bereich der Strähnenförderung.

2.1.2 Theoretische Betrachtung zum Förderzustandsdiagramm für die Dicht- und Dünnstromförderung

Um die Förderzustände, die sich beim Transport des Fördergutes in der Gasströmung einstellen, möglichst vergleichbar darzustellen, wurde das folgende Förderzustandsdiagramm, Abbildung 2.1.2-1, gewählt. In diesem FZD ist der auf die Förderstreckenlänge L bezogene Druckverlust gegen die eingestellte mittlere Gasgeschwindigkeit v_0 , bezogen auf den fördergutfreien Leitungsquerschnitt, für alle Bewegungsvariationen der Partikel in der Förderleitung bei konstantem Gutmassenstrom $\dot{m}_{\text{Fördergut}}$ jeweils auf einer Kennlinie aufgetragen. Wobei diese mittlere Gasgeschwindigkeit v_0 nach [Str05] als ein Maß für den Volumenstrom des Fördergases angesehen werden kann und als Leerrohrgeschwindigkeit bezeichnet wird. Diese Leerrohrgeschwindigkeit entspricht der Fördergasgeschwindigkeit, die das Gas in der leeren Förderstrecke annehmen würde. In der Realität ergibt sich eine höhere Gasgeschwindigkeit in der mit Fördergut beaufschlagten Förderstrecke bei gleichem Fördergasmassenstrom [Hon95]. Voraussetzung für eine gute Übereinstimmung von Theorie und Praxis ist hierbei ein konstanter Fördergasmassenstrom über die gesamte Förderstreckenlänge, für die die Leerrohrgeschwindigkeit bestimmt werden soll.

Außer dem Gutmassenstrom ist auch die Beladung μ (s. Gleichung (2.1.2.1)) als Kennlinienparameter eine gebräuchliche Darstellungsform.

$$\mu = \frac{\dot{m}_{\text{Fördergut}}}{\dot{m}_{\text{Fördermedium}}} \quad (2.1.2.1)$$

mit:

$$\dot{m}_{\text{Fördergut}} = \text{Massenstrom des Fördergutes in } \text{kg} / \text{s}$$

$$\dot{m}_{\text{Fördermedium}} = \text{Massenstrom des Fördermediums in } \text{kg} / \text{s}$$

Das FZD beschreibt wie die betrachtete pneumatische Förderung das Fördergut transportieren kann und kann als Grundlage für die Auslegung benötigter Gebläse oder Verdichter dienen.

Theoretisch ist jeweils für die horizontale und die vertikale Förderung eines monodispersen Fördergutes die Existenz eines Förderzustandsdiagramms denkbar. Im Hinblick auf das real vorhandene Fördersystem mit seinen horizontalen, vertikal-ansteigenden und vertikal-fallenden Förderleitungsabschnitten ist keine dieser Modelldarstellungen dazu in der Lage, die Praxis mehr als abschnittsweise dazustellen [Est01]. Eine weitere Darstellung abgeleiteter Größen wie des Widerstandsbeiwertes über die Ähnlichkeitszahl wäre gemäß [Sie91] in diesem Zusammenhang nicht zielführend.

Das Förderzustandsdiagramm in Abbildung 2.1.2-1 aus [Ger97] zeigt den Bereich, zwischen der Druckverlust-Kurve der Fördergasströmung in der sonst leeren Förderleitung und der Stopfgrenze (dünne, schwarze Linien). In diesem Bereich ist die pneumatische Förderung in unterschiedlichen Förderzuständen möglich [Her08]. Für die Dünnstromförderung charakteristisch ist eine hohe Fördergasgeschwindigkeit bei kleinem Massenstrom. Nach [Len84] ist für die Dünnstromförderung eine Geschwindigkeit des Fördergases von 29 m/s notwendig. Die beginnende Segregation trennt als gestrichelte Linie die Dünnstromförderung von der Strähnenförderung. Bei sehr niedrigen Fördergasgeschwindigkeiten schließt sich die Pfpfenförderung an die Strähnenförderung an.

Allgemein gilt die Stopfgrenze als erreicht, wenn der Druckverlust eines entstandenen Fördergutballens vom Gebläse oder Verdichter nicht mehr überwunden werden kann. Für unterschiedliche Fördergüter wurde im Bereich der Dichtstromförderung diese Stopfgrenze allgemeingültig nachgewiesen. Die zugehörigen Beladungen beliefen sich bis zu $\mu = 50$ [Wen⁺03].

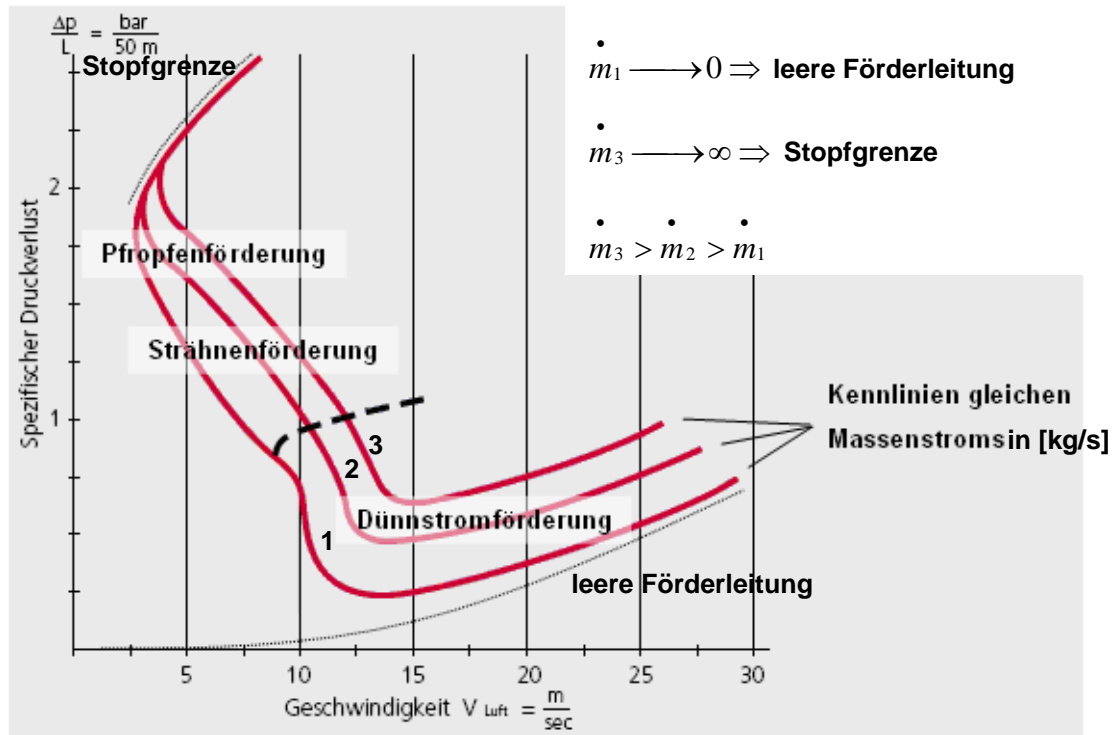


Abbildung 2.1.2-1: Förderzustandsdiagramm aus [Ger⁺97], [Her08]

Über die Länge L der Förderstrecke stellt sich ein Druckgefälle ein [Sch02]. Der Druckverlust ist an Krümmern und Bögen besonders hoch. Hier treten Wechselwirkungen der Partikel mit den Innenwänden der Rohrleitungsbögen auf, und führen zu besagten Druckverlust und Leitungsverleiß. Hierbei nehmen nach [Sie91] der Verschleiß und der Druckverlust mit ansteigendem Krümmungswinkel zu. Beim Transport über eine längere Förderstrecke mit mehreren Krümmern bzw. einem größeren Hub, ist es erforderlich die Förderanlage mit einem höheren Systemdruck zu beaufschlagen, um den sich ergebenden höheren Druckverlust über die Förderstreckenlänge für eine gleich bleibende, kontinuierliche Förderleistung zu gewährleisten [Noy00].

Charakteristische Parameter zur Beschreibung einer Förderanlage sind

- Förderstreckenlänge L in m
- Anzahl Krümmer n_{Kr}
- Verhältnis von Krümmungsradius zu Leitungsradius
- Krümmungswinkel
- Hub H in m
- Horizontaler oder vertikaler Verlauf
- Förderleitungsmaterial
- Fördergut

Der gesamte Druckverlust setzt sich nach [Sie91] gemäß Gleichung (2.1.2.2) zusammen

$$\Delta p_{\text{Gesamt}} = \Delta p_{\text{Fördermedium}} + \Delta p_{\text{Fördergutbeschleunigung}} + \Delta p_{\text{Krümmer}} + \Delta p_{\text{Hub}} + \Delta p_{\text{Fördergutreibung}} \quad (2.1.2.2)$$

mit:

$$\Delta p_{\text{Index}} = \text{Druckverlust in } \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$$

Für einen definierten Aufbau, der die o. g. charakteristischen Parameter wie die Förderleitungen, das Förderleitungsmaterial und das Fördergut beinhaltet, existiert genau ein Förderzustandsdiagramm entsprechend Abbildung 2.1.2-1.

Werden Änderungen an diesen Parametern vorgenommen, folgen daraus Änderungen im Kennlinienverlauf des Förderzustandsdiagramms. Während der Versuchsdurchführung sind im stationären Betrieb an den horizontalen oder vertikalen Orten im Förderstreckenverlauf unterschiedliche Förderzustände beobachtbar. So können z. B. Strähnen den Druckbehälter verlassen und danach durch einen Krümmer in den vertikal nach oben geführten Förderstreckenverlauf entgegengesetzt der Gewichtskraft umgeleitet werden. Hierdurch bilden sich Pfropfen aus. Diese Pfropfen haben im Gegensatz zur Strähne eine geringere Durchgasung. [Nie06] zeigt, dass von der Unterseite jedes Pfropfens jeweils Fördergut auf die Oberseite des folgenden Pfropfens fällt. Dieses Phänomen stellt sich auch im senkrecht steigenden Teil der Förderleitung der Pilotanlage dar. Nach einer darauf folgenden Umleitung in einen horizontalen Anlagenteil lösen sich die Pfropfen wieder zu Strähnen. Folgt ein vertikal fallender Förderstreckenabschnitt, so lösen sich die Strähnen oder Pfropfen in Fördergutanteile mit einer sehr hohen Durchgasungsrate. Hierbei wirkt die Gewichtskraft in Richtung des pneumatischen Transportes [Sch95]. Für alle ähnlich im Raum ausgerichteten Förderstreckenabschnitte mit gleicher Förderrichtung sind auch vergleichbare Förderzustände charakteristisch, s. Gleichung (2.1.2.3) [Nie02].

Bei der Modellbetrachtung der Fördergutpartikel gemäß [Nie06] und [Str05] als monodisperse Kugeln, welche in drei Dimensionen rotieren können und sich in einem vertikal fallenden Pfropfen befinden, wirken auf einen Partikel die folgenden Kräfte

- Trägheitskraft
- Gewichtskraft
- Summe folgender Kontaktkräfte
 - Viskose Dissipation
 - Coulombreibung Partikel/Partikel
 - Coulombreibung Partikel/Wand
- Widerstandskraft der Gasströmung

Für ein derartiges Fördergutpartikel stellt [Nie06] folgende Bewegungsgleichung auf

$$m \cdot \ddot{\vec{x}} = m \cdot \vec{g} + \vec{F}_C + \frac{m \cdot \text{grad}(P)}{\rho_s \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (2.1.2.3)$$

mit:

$$\frac{\text{grad}(P)}{\rho_s \cdot (1 - \varepsilon)} = \text{Vektorfeld der Änderung des Fördergasdruckes in alle drei Raumrichtungen pro Pfropfendichte}$$

m = Masse des monodispersen, kugelförmigen Fördergutpartikels in kg

\ddot{x} = Beschleunigung in Transportrichtung in m/s^2

\vec{g} = Erdbeschleunigung in m/s^2

\vec{F}_c = Summe der Kontaktkräfte in $(kg \cdot m)/s^2$

P = Druck am Ort des betrachteten Fördergutpartikels in $kg/(m \cdot s^2)$

ρ_s = Fördergutedichte in kg/m^3

$\varepsilon = \frac{\text{Porenvolumen der Schüttung}}{\text{Gesamtvolumen der Schüttung}} = \text{Lückengrad}$

Die Bewegungsgleichung (2.1.2.3) stellt das Gleichgewicht zwischen der Trägheitskraft einerseits und der Gewichtskraft, der Summe aller Kontaktkräfte sowie der Widerstandskraft aufgrund des Fördergases andererseits dar.

Bei der Betrachtung der Projektion der Querschnittsfläche der Förderleitung in Transportrichtung auf die Leitungsinnenfläche eines Krümmers erhält man die Fläche, auf die die Fördergutpartikel stoßen. Es ist ersichtlich, dass genau dort der höchste Verschleiß der Leitung und der Fördergutpartikel auftreten. Hierdurch wird nach [Pra⁺84] ebenfalls ein Druckverlust generiert.

Wird die Stopfgrenze aufgrund zu hohen Druckverlustes im Fördersystem erreicht, dann geschieht dies bevorzugt am Ende jeder Förderstrecke, und zwar an Stellen des nach oben gerichteten vertikalen Transportes.

Im störungsfreien Betrieb der pneumatischen Kohlenstaubzugaben über die Blasformen kann der Aufbau der Förderstrecke als gleich bleibend angenommen werden. Dennoch ist eine unterschiedliche Förderung aufgrund verschiedener Kohlenstäube im Betrieb realistisch. Mit der Ergun-Gleichung (2.1.2.11) ist der Einfluss der Förderguteigenschaften beschreibbar. Sie gilt für Schüttungen kugelförmig monodisperser Fördergüter. In der Praxis ist das Kohlepulver ein polydisperses Stoffsystem. Die einzelnen Partikel in diesem System können, z. B. nach Stößen untereinander und/oder mit der Leitungsinnenwand unterschiedliche Sphärizitäten aufweisen, die sich im weiteren Förderstreckenverlauf außerdem noch ändern können.

Die von [Erg⁺49] zugrunde gelegte für Schüttungen gültige Gleichung (2.1.2.4) stammt aus [Chi⁺31] und wurde von Ergun zur Beschreibung einer Druckdifferenz basierend auf einen kinetischen Effekt mit einem Reibungsfaktor λ modifiziert, welcher wiederum eine Funktion der Reynoldszahl ist.

$$\frac{P_0 - P_L}{\Delta l} = \frac{2 \cdot \lambda \cdot \rho_L \cdot v_0^2}{D_p} \quad (2.1.2.4)$$

mit:

P_0 = Druck am Förderstreckenbeginn in $kg/(m \cdot s^2)$

P_L = Druck am Förderstreckenende in $kg/(m \cdot s^2)$

Δl = betrachteter Förderstreckenabschnitt in m

λ = Reibungsfaktor

ρ_L = Fördermediumsdichte in kg/m^3

v_0 = Leerrohrgeschwindigkeit in m/s

D_p = hydraulischer Durchmesser bzw. Durchmesser eines kugelförmigen

Förgergutpartikels in m

Ergun stellt in [Erg⁺49] das Ergebnis der Untersuchung unterschiedlicher Berechnungsverfahren aus [Lev⁺47] dar, bei denen der Lückengrad ε zusätzlich in Gleichung (2.1.2.4) einfließt. Der hierfür verwendete Faktor ist in der Form $\left((1-\varepsilon)^1 \text{ bzw. } 2\right) / \varepsilon^3$ modelliert worden. Hierbei stellte [Erg⁺49] fest, dass sich der Druckabfall bei niedrigen Geschwindigkeiten des Fördermediums hinreichend genau auf viskose Kräfte zurückführen lässt. Für höhere Fördergasgeschwindigkeiten ist der Druckabfall mit kinetischen Effekten zusammen mit Faktoren beschreibbar, die wiederum Funktionen des Fördergasdurchflusses sind. Zur Erstellung einer Gleichung für die Beziehung zwischen dem Druckabfall und dem Fördergasdurchfluss mit Gültigkeit für einen weiten Bereich der Fördergasgeschwindigkeit diente [Erg⁺49] grundlegend die Annahme von Kozeny, dass ein Partikelbett mit einer Anzahl paralleler gleichgroßer Kanäle modelliert werden kann. In diesem Modell entsprechen die innere Oberfläche der gesamten Partikeloberfläche und das freie innere Volumen dem Lückenvolumen eines zufällig angeordneten Partikelbettes. Das Gesetz von Hagen-Poiseuille, welches nur für die laminare Rohrströmung Gültigkeit besitzt, stellt zur Beschreibung des Durchflusses eines viskosen Fluides durch einen dieser Kanäle die Beziehung zwischen dem Gasvolumenstrom, der Druckdifferenz und der Länge des Partikelbettes L_B dar, wobei der Gasvolumenstrom direkt proportional zur Druckdifferenz und indirekt proportional zur Länge des Partikelbettes ist. Die Länge des Partikelbettes entspricht der Strähnen- oder Ballenlänge. Somit ist der Fördergasvolumenstrom nach Hagen-Poiseuille

$$\dot{V}_L = \frac{\pi \cdot D_m^4}{128 \cdot \eta} \cdot \frac{(P_0 - P_L)}{L_B} \quad (2.1.2.5)$$

mit:

\dot{V}_L = Fördergasvolumenstrom in m^3/s

D_m = mittlerer Förderbettdurchmesser in m

η = dynamische Viskosität des Fördermediums in $Pa \cdot s$

L_B = Länge des Partikelbettes in m

Aus Gleichung (2.1.2.5) wird unter Verwendung der mittleren kreisförmigen Querschnittsfläche Gleichung (2.1.2.6). Betrachtungen zu hydraulischen Querschnittsflächen sollen hier nicht weiter vertieft werden.

$$\dot{V}_L = \frac{A_m^2}{8 \cdot \pi \cdot \eta} \cdot \frac{(P_0 - P_L)}{L_B} \quad (2.1.2.6)$$

mit:

A_m = mittlere Förderbettquerschnittsfläche in m^2

Mit Gleichung (2.1.2.6) ist die Ableitung des Druckes nach der Partikelbettlänge folgendermaßen beschreibbar, wobei ein gedachtes Gasvolumen, welches pro Zeiteinheit durch die Querschnittsfläche eines Ballens aus Fördergutpartikeln strömt eine Geschwindigkeit aufweist, die als mittlere Fördergasgeschwindigkeit in den gedachten Kanälen wieder zu finden ist.

$$\frac{dp}{dL_B} = \frac{8 \cdot \pi \cdot \eta \cdot \overline{v_{Kanal}}}{A_m} \quad (2.1.2.7)$$

mit:

$$\frac{dp}{dL_B} = \text{Ableitung des Druckes nach der Partikelbettlänge in } kg/(m^2 \cdot s^2)$$

$$\overline{v_{Kanal}} = \text{mittlere Fördergasgeschwindigkeit in einem Kanal nach Kozeny in } m/s$$

Die Erweiterung von Gleichung (2.1.2.7) um einen Summanden, der die Umwandlung in kinetische Energie nach Brillouin [Bri07] für den Durchfluss des Fördermediums durch einen Kanal nach Kozeny beschreiben kann, ergibt Gleichung (2.1.2.8).

$$\frac{dp}{dL_B} = \frac{32 \cdot \eta \cdot \overline{v_{Kanal}}}{D_K^2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho_L \cdot \overline{v_{Kanal}}^2}{D_K} \quad (2.1.2.8)$$

mit:

$$D_K = \text{mittlerer Kanaldurchmesser in } m$$

Für zylindrische Kanäle nach Kozeny erhält [Erg⁺49] die Gleichung (2.1.2.9)

$$\frac{dp}{dL_B} = 2 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \eta \cdot v_0 \cdot S_V^2 + \frac{1}{8} \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \rho_L \cdot v_0^2 \cdot S_V \quad (2.1.2.9)$$

mit:

$$S_V = 6/D_p = \text{spezifische Fördergutoberfläche kugelförmigen Fördergutes in } m^{-1}$$

[Erg⁺49] erwähnt, dass in Realität die von Kozeny beschriebenen Kanäle verschlungen sind und sich im Raum einander nähern oder voneinander entfernen. Der Druckabfall aufgrund der Umwandlung in kinetische Energie wurde bisher für jeden dieser Kanäle einmal modelliert. [Erg⁺49] stellte weiterhin einen statistischen Zusammenhang zwischen der Häufigkeit dieses Druckabfalls aufgrund der Umwandlung in kinetische Energie und der Fördergutpartikelanzahl pro Längeneinheit fest und bestimmte Korrekturfaktoren sowohl für den laminaren, wie auch für den turbulenten Bereich aus Messungen mit unterschiedlichen Fördergütern. Gemäß [Bra57] lautet die Ergun-Gleichung unter Einbeziehung dieser Koeffizienten aus [Erg⁺49] für Schüttungen

$$\frac{(P_0 - P_L)}{L_B} = k \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\eta \cdot G \cdot S_V^2}{\gamma_L} + 0,292 \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{G^2 \cdot S_V}{g \cdot \gamma_L} \quad (2.1.2.10)$$

Nach [Bra57] berechnete Ergun aus Versuchsergebnissen für die Kozeny-Konstante k einen Wert von 4,16.

Unter Verwendung von:

$$G = G_0 \cdot g = \text{Mengenstromdichte des Fördermediums in } kg/(m \cdot s^3)$$

$$G_0 = \rho_L \cdot v_0 = \text{Massenstromdichte des Fördermediums in } kg/(m^2 \cdot s)$$

$$\gamma_L = \rho_L \cdot g = \text{spezifisches Gewicht des Fördermediums in } kg/(m^2 \cdot s^2)$$

$$S_V = 6/D_p = \text{spezifische Fördergutoberfläche kugelförmigen Fördergutes in } m^{-1}$$

lässt sich Gleichung (2.1.2.10) in Gleichung (2.1.2.11) umformen, die von [Sch95] als Ergun-Gleichung bezeichnet wird

$$\frac{(P_0 - P_L)}{L_B} = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\eta \cdot v_0}{D_p^2} + 1,75 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_L \cdot v_0^2}{D_p} \quad (2.1.2.11)$$

und für $3 \leq Re \leq 10^4$ nach [Sch95] Gültigkeit besitzt.

Der auf die Förderstreckenlänge bezogene Druckabfall der pneumatischen Förderung in Gleichung (2.1.2.11) setzt sich zusammen aus der Gleichung von Blake-Kozeny (2.1.2.12) nach [Sch95], die als erster Summand in Gleichung (2.1.2.11) das Verhalten im laminaren Bereich beschreibt

$$\frac{(P_0 - P_L)}{L_B} = 150 \cdot \frac{\eta \cdot v_0}{D_p^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (2.1.2.12)$$

und nach [Sch95] für $\frac{D_p \cdot \rho_L \cdot v_0}{\eta \cdot (1 - \varepsilon)} < 10$ gilt und der Burke-Plummer-Gleichung (2.1.2.13) nach [Sch95] zur Darstellung des Druckverlustes im turbulenten Bereich,

$$\frac{(P_0 - P_L)}{L_B} = 3,5 \cdot \frac{1}{D_p} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot v_0^2 \right) \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (2.1.2.13)$$

die für $\frac{D_p \cdot \rho_L \cdot v_0}{\eta \cdot (1 - \varepsilon)} > 1000$ nach [Sch95] gültig ist und den zweiten Summanden in Gleichung (2.1.2.11) ausmacht.

Der spezifische Druckverlust aus Gleichung (2.1.2.11) bildet nach [Mus⁺86] die Ordinate und die Leerrohrgeschwindigkeit die Abszisse eines Förderzustandsdiagramms. Eine Kennlinienschar entsteht hierbei aufgrund unterschiedlicher Parameter für η , ε und D_p . In ihrem Verlauf ähneln diese Kennlinien der Druckverlustkurve der Fördergasströmung in der sonst leeren Förderleitung, siehe Abbildung 2.1.2-1.

Prinzipiell ist zur Darstellung des Verlaufs von Gleichung (2.1.2.11) zu sagen, dass es sich hierbei um die Überlagerung eines linear ansteigenden und eines quadratisch ansteigenden Verlaufs, bei Erhöhung der Leerrohrgeschwindigkeit handelt. Somit ist der fallende Abschnitt der Kennlinien während der Pfropfen- und Strähnenförderung mit diesem Ansatz nicht beschreibbar. Ein mathematisches Modell zur pneumatischen Strähnen- und Pfropfenförderung wird in Kapitel 3 vorgestellt.

Nach [Bra57] gilt das Widerstandsgesetz nach Gleichung (2.1.2.14), wobei k die aus (2.1.2.10) bekannte Kozeny-Konstante darstellt. [Jes64] beschreibt, dass [Bra57] für die Widerstandszahl die Gleichung (2.1.2.14) aus Versuchsergebnissen nach [Erg⁺49] mit Gleichkornschüttungen

statistisch gleichmäßig verteilter scharfkantiger Fördergutpartikel ermittelt hat und kommt hiermit zu einer zweckmäßigen Darstellung.

$$\psi = 36 \cdot k \cdot \frac{1}{\text{Re}} + 1,75 = \frac{150}{\text{Re}} + 1,75 \quad (2.1.2.14)$$

mit:

$$\text{Re} = \frac{\rho_L \cdot v_0 \cdot D_P}{\eta} \cdot \frac{1}{1-\varepsilon} = \text{Reynoldszahl}$$

$$D_h = \frac{6}{S_v} = \text{hydraulischer Durchmesser}$$

$$\psi = \frac{P_0 - P_L}{L_B} \cdot \frac{g \cdot \gamma_L \cdot D_P}{G^2} \cdot \frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} = \text{Widerstandszahl, wenn für kugelförmige}$$

Fördergutpartikel der hydraulische Durchmesser dem Partikeldurchmesser entspricht

$$D_P = D_h$$

Diese Gleichung (2.1.2.14) wird auch als Ergun-Gleichung bezeichnet. Die Ergun-Gleichung in dimensionsloser Form (2.1.2.15) lautet nach Gleichung (2.1.2.11) gemäß Schwerdtfeger [Sch95]

$$\left[\frac{(P_0 - P_L)}{G_0^2} \cdot \rho_L \right] \cdot \left[\frac{D_P}{L_B} \right] \cdot \left[\frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} \right] = 150 \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{D_P G_0 / \eta} + 1,75 \quad (2.1.2.15)$$

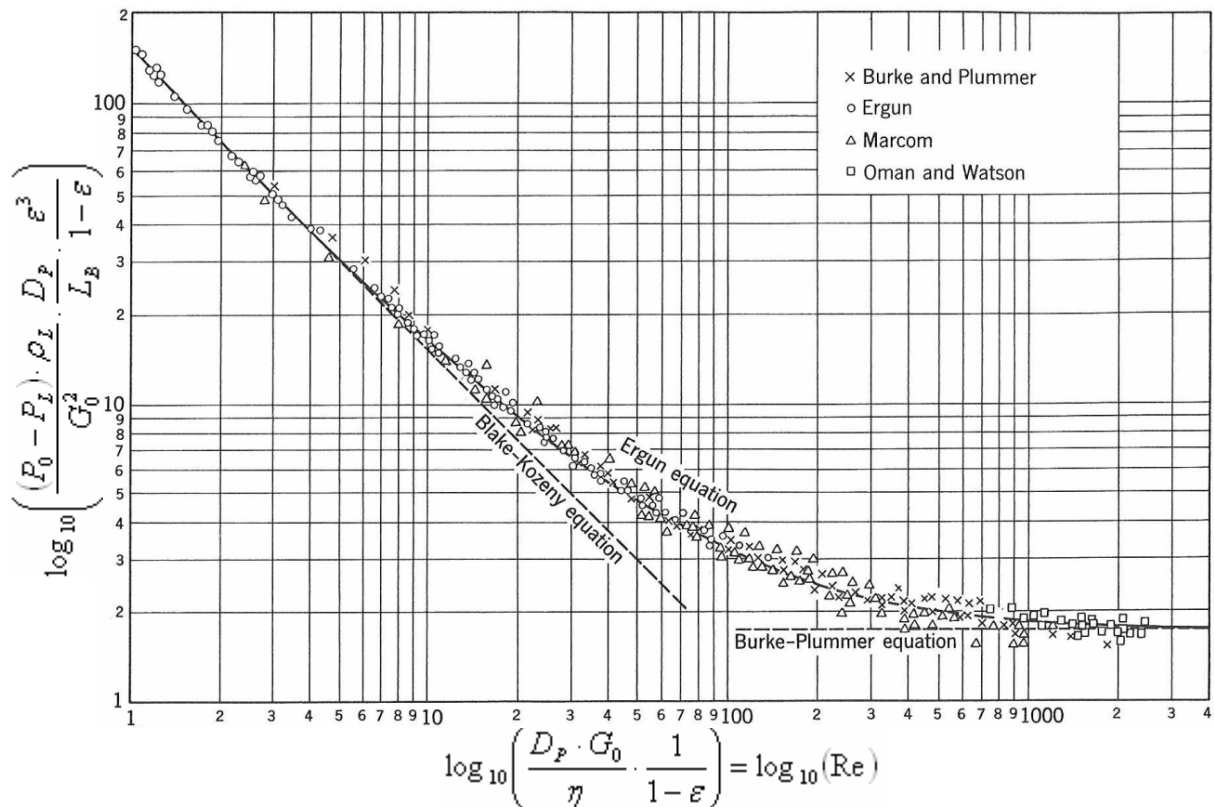


Abbildung 2.1.2-2: Dimensionsloser Druckabfall als Funktion der Reynoldszahl nach [Bir⁺ 60]

Abbildung 2.1.2-2 nach[Bir⁺60] vergleicht Gleichung (2.1.2.15) mit experimentell ermittelten Daten. Hierbei wird der dimensionslose Druckabfall ψ , der auch als Widerstandsbeiwert oder Widerstandszahl der Strömung bezeichnet wird, als Funktion der Reynoldszahl dargestellt. Die Abbildung verdeutlicht die Übereinstimmung der von Ergun getroffenen Aussage für den laminaren und turbulenten Bereich sowie im Übergangsbereich, in dem die Blake-Kozeny-Gleichung und die Burke-Plummer-Gleichung jeweils ihre Übereinstimmung mit der Realität verlieren.

In der Strömungslehre wird häufig die dimensionslose Reynoldszahl Re , welche das Verhältnis von Trägheitskraft zur Zähigkeitskraft beschreibt, verwendet. Sie veranschaulicht, den Druckverlust über den Förderstreckenverlauf, siehe Gleichung (2.1.2.11). Nach [Wel86] ist dabei D_p der Kugeldurchmesser eines monodispersen Stoffsystems, welches das gleiche Gesamtvolumen und die gleiche Oberfläche wie das durch volumenäquivalente Kugeln idealisierte reale polydisperse Stoffsystem besitzt. Diese Kenngröße einer Korngrößenverteilung wird als Sauter-Durchmesser bezeichnet.

Das im Hochofenprozess eingesetzte reale Kohlepulver ist polydispers und besitzt keine ideale Kugelform. Beschreiben lässt sich eine ungleichmäßige Korngrößenverteilung mit der Gleichung (2.1.2.16) nach [Sch95]

$$\frac{1}{D_{eff}} = \frac{1}{\overline{D_p}} = \sum_i \frac{w_i}{D_{p_i}} \quad (2.1.2.16)$$

mit:

D_{eff} = effektiver Durchmesser eines Fördergutpartikels in m

$\overline{D_p}$ = mittlerer Durchmesser der Partikel in m

D_{p_i} = Maschenweite des Siebes i in m

w_i = Massenanteil der Fördergutpartikel aus Siebung i

Da sich Unterschiede bei den Kohlestäuben hinsichtlich ihrer Korngrößenverteilungen ergeben, brauchen unterschiedliche Stäube ($\overline{D_p}$ aus Gleichung (2.1.2.16) jeweils eingesetzt für D_p in Gleichung (2.1.2.11)) auch unterschiedliche Drücke zur vergleichbaren Förderung. Ebenfalls zeigen die Sphärizität, auf die im nächsten Abschnitt näher eingegangen wird, und der Lückengrad des Fördergutes hierüber ihren Einfluss auf den für die Förderung notwendigen Förderdruck. Dies veranschaulicht, dass bei Änderung der Korngröße oder Sphärizität des Fördergutes unter Beibehaltung des Fördergutmassenstroms, des Fördermediums mit seinem Volumenstrom, des Systemdrucks und der Förderleitungsgeometrie, sich die Partikelbettlänge ändert und somit u. U. der Förderzustand.

2.2 Kornformkennzahlen des Fördergutes

Schüttgüter sind nach [Sti92] in ihrer Korngröße unterteilbar in

- kolloiddisperse Teilchen (1 nm bis 1 µm)
- feindisperse Teilchen (1 µm bis 100 µm)
- grobdisperse Teilchen (100 µm bis 2 cm)

Zur Beschreibung feindisperser Schüttgüter dienen die Sphärizität nach Wadell und der Heywoodfaktor. Bereits 1935 wurde vom Geologen Hakon Wadell der Begriff Sphärizität definiert [Wad35]. Hierbei wird die Kenngröße beschrieben, die festlegt, wie kugelförmig ein Körper ist. Durch die Sphärizität Ψ wird das Verhältnis der Oberfläche einer Kugel mit gleichem Volumen zur Oberfläche des Partikels beschrieben.

Es gilt

$$\Psi = \frac{\pi^{\frac{1}{3}} \cdot (6 \cdot V_p)^{\frac{2}{3}}}{A_p} = \frac{1}{f_{Hey}} \quad (2.2.1)$$

mit:

V_p = Volumen eines Fördergutpartikels in m^3

A_p = Oberfläche eines Fördergutpartikels in m^2 , siehe Kapitel 4.3.2

Wie aus Tabelle 2.2-2 und Gleichung (2.2.1) ersichtlich ist, beträgt der Wert der Sphärizität einer Kugel 1. Zur Beschreibung des Einflusses der äußeren Partikelform auf die Sinkgeschwindigkeitsberechnung bzw. zur Kennzeichnung des Fließverhaltens der betrachteten Schüttungen dient nach [Leh06] der Heywoodfaktor f_{Hey} . Der Heywoodfaktor ist das Verhältnis der gemessenen Partikeloberfläche zu einer Kugeloberfläche mit Äquivalentdurchmesser. Gehört der Äquivalentdurchmesser der volumengleichen Kugel, wird der Heywoodfaktor zum Kehrwert der Sphärizität nach Wadell. Für eine Auswahl diverser Schüttgüter ist der jeweilige Heywoodfaktor in Tabelle 2.2-1 dargestellt.

Schüttgut	Heywood-Faktor
Kugeln	1,0
Sand	1,3 - 1,4
Zement	1,8
Kohlenstaub	1,8 - 2,1
Flugstaub, Zucker	1,2 - 2,3
Quarz	1,8 - 4,0
Glimmerplättchen	9,3

Tabelle 2.2-1: Heywoodfaktoren für Kornformen verschiedener Schüttgüter nach [Leh06]

Die Kornformbeurteilung grobdisperser Schüttgüter erfolgt gemäß der Grunddefinition - Verhältnis Länge zur Breite der Partikel - und der dazugehörigen Mengenanteile.








Fläche		Sphärizität $SPHT = U/2 \cdot \sqrt{\sigma} \cdot A$	kleinster/größter Durchmesser
Kreis		1,000	1,0
20 – Eck, gleichseitig		1,004	1,0
Ellipse 2:1		1,091	2,0
Quadrat		1,128	1,414
Ellipse 3:1		1,260	3,0
Dreieck, gleichseitig		1,286	2,472
Ellipse 4:1		1,391	4,0

Tabelle 2.2-2: Sphärizitäten in Abhängigkeit der Geometrie aus [Sta04]

Allerdings können nach [Bar58] Kornformkennzahlen wie die Sphärizität nur als Näherungsgrößen der Korngestalt eines polydispersen Systems realer Partikel gelten. Ab Beladungen von $\mu = 2$ ist das Verhalten hinsichtlich des Druckverlustes bei der pneumatischen Förderung polydisperser Fördergutpartikel darüber hinaus mit dem mittleren Partikeldurchmesser d_{50} , bei einem Wert von 0,5 der Rückstandskurve $R(d = d_{50})$ aus [VDI02], beschreibbar. Hiernach zeigen nach Bestimmung der Korngrößenverteilung viele polydisperse Systeme wie z. B. gemahlene Steinkohle, bei doppelt logarithmischer Auftragung der Rückstandskurve $R(d)$ gegen den Teilchendurchmesser d , einen proportionalen Verlauf.

3 Mathematisches Modell zur pneumatischen Strählen- und Pfropfenförderung

Um eine optimierbare pneumatische Förderung zum Einblasen des Kohlenstaubes während des Hochofenprozesses zu erhalten, ist es notwendig, einen oder mehrere aussagekräftige Prozessparameter zu definieren und zu erfassen, um auf diese Weise rechnergestützt den Betriebszustand des Anlagenteils darstellen und definitiv beeinflussen zu können. Die im Rahmen dieser Arbeit an der Pilotanlage gewonnenen Messwerte bilden zusammen mit einem für die betrachtete pneumatische Förderung im Übergangsbereich zwischen der Pfropfen- und der Strähnenförderung gültigen mathematischen Modell die Grundlage für die genannte Darstellungsmöglichkeit während des kontinuierlichen Pilotanlagenbetriebs.

Eine Grundlage dieser Betrachtung bildet die Ähnlichkeitstheorie, die es ermöglicht, einen realen physikalischen Zusammenhang mit einem Modell auf Basis dimensionsloser Kennzahlen darzustellen, indem eine Dimensionsanalyse, wie in [Rud97], [Rud02] und [Spi06] beschrieben, durchgeführt wird. Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Ähnlichkeitstheorie ist die physikalische Ähnlichkeit beider Systeme, die durch gleiche Werte der dimensionslosen Kennzahlen gegeben ist. Diese Methode ist dann besonders hilfreich, wenn die, den physikalischen Zusammenhang beschreibende dimensionshomogene Funktion, unbekannt ist. In diesem Fall werden Beobachtungen oder physikalische Gesetzmäßigkeiten zugrunde gelegt, um eine Relevanzliste zu erstellen. Aus einer vorhandenen dimensionshomogenen Funktion $x_n = f(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})$, die einen realen physikalischen Zusammenhang beschreibt, lässt sich sehr anschaulich die Relevanzliste dieses physikalischen Zusammenhangs bestehend aus den dimensionsbehafteten $x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n$ gewinnen. Bei vorhandener Dimensionshomogenität gilt folgendes Pi-Theorem nach [Buc14]: Existiert eine vollständig dimensionshomogene Beziehung f mit n dimensionsbehafteten Variablen $x_i \in R$, so existiert demnach auch eine dimensionslose Beziehung F von m dimensionslosen Kennzahlen $\pi_j \in R$ mit $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ und $F(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m) = 0$. Hierbei gilt $m = n - r$ mit $r = \text{Rang der Dimensionsmatrix}$.

In diesem Zusammenhang generieren gemäß [Szi90] für die Strähnen- und Pfropfenförderung der Feststoffreibungsbeiwert und der sich daraus ergebende Druckverlust die gesuchte Größe. Dimensionslose Kennzahlen wie z. B. die Froude-Zahl, die das Verhältnis von Trägheitskräften zu Schwerkraften beschreibt, lassen sich aus den Messwerten berechnen und die Anzahl von Einflussgrößen, die das Verhalten bei der Strähnen- und Pfropfenförderung beschreiben, ist nun überschaubarer, [Szi90] und [Tsu00].

Des weiteren führt der Verlauf des Graphen im Übergangsbereich der Förderzustände Strähnen- und Pfropfenförderung im Förderzustandsdiagramm Abbildung 2.1.2-1 zu Gleichung (3.1), die als Basis für alle weiteren Betrachtungen dient, indem sie gemäß [Nie06] und [Szi90] den Gesamtdruckverlust über die gesamte Förderstreckenlänge beschreibt, der von der Wandreibung des Fördermediums und dem Druckverlust aufgrund der Wandreibung und der Stöße der Feststoffpartikel herrührt. Hierbei betrachten [Szi90] und [Sch89] einen Fördergutpfropfen als ein sich in Bewegung befindliches Fließbett, welches vom Fördermedium durchströmt wird. Die Gleichung (3.1) ist zu ihrem größten Teil aus der Beschreibung der pneumatischen Dünnstromförderung bekannt und wurde im Rahmen dieser Arbeit auch für die Anwendung zur

Druckverlustrechnung im Übergangsbereich der pneumatischen Strählen- und Pfropfenförderung verwendet, da sich die Gesetzmäßigkeiten für die Schüttgutmechanik und der Fördergasströmung ebenfalls auf die pneumatische Strählen- und Pfropfenförderung anwenden lassen und um den Faktor μ^f erweitert, der die Steigung des Graphen im betrachteten Förderzustandsbereich anpassen kann. Die dimensionslose Kennzahl Beladung μ besitzt einen Exponenten f . Der Wert des Exponenten kann nicht als konstant betrachtet werden. Generell kann von der folgenden Gleichung für die Förderung im Strählen-/Pfropfenbereich ausgegangen werden, wobei die Notation für die folgenden Gleichungen am Ende des Abschnitts erfolgt und D im weiteren Verlauf für den Förderleitungsinne Durchmesser steht

$$\frac{dp}{dL} = \frac{\mu \cdot \lambda_{tot} \cdot v_0^2 \cdot \rho_L}{D \cdot 2} \cdot \mu^f \quad (3.1)$$

Solange f reell ist, ist die Gültigkeit der Dimensionshomogenität von Gleichung (3.1) erfüllt. Hierbei ist nach [Mus59] und [Seg34] der Feststoffreibungsbeiwert λ_{tot} mit Gleichung (3.2) beschreibbar.

$$\lambda_{tot} = \frac{p_a^2 - p_e^2}{2 \cdot p_e} \cdot \frac{D}{L} \cdot \frac{2}{\rho_L \cdot v_e^2} \quad (3.2)$$

Nun kann λ_{tot} bestimmt werden. [Szi87] ist für die horizontale Dünnstromförderung bei gleich bleibenden Förderzuständen von folgender Druckverlustgleichung (3.3) aus [Bar58] ausgegangen.

$$\Delta p = (\lambda_L + \lambda_F \cdot \mu) \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot \overline{v_L}^2 \cdot \frac{\Delta L}{D} \quad (3.3)$$

Hierin hat [Szi87] λ_{tot} gemäß Gleichung (3.4) eingeführt.

$$\lambda_{tot} = \lambda_F + \frac{\lambda_L}{\mu} \quad (3.4)$$

Gleichung (3.4) in Gleichung (3.3) eingesetzt ergibt folgende Gleichung (3.5), die nach λ_{tot} aufgelöst wurde und als vollständig dimensionshomogene Beziehung f für die horizontale Dünnstromförderung verwendet werden kann.

$$\lambda_{tot} = \frac{\Delta p}{\Delta L} \cdot \frac{2 \cdot D}{\mu \cdot \rho_L \cdot \overline{v_L}^2} \quad (3.5)$$

Zu erkennen ist die Ähnlichkeit von Gleichung (3.5) für die Dünnstromförderung zu Gleichung (3.1), die zur Beschreibung des Strählen-/Pfropfenbereichs dient. Der Unterschied des Kennlinienverlaufs wird in den beiden Gleichungen mit $\overline{v_L}^2$ bzw. $v_0^2 \cdot \mu^f$ beschrieben.

[Szi87] hat unter Berücksichtigung der Ähnlichkeit in der Geometrie $\frac{d_{50}}{D}$, der Dynamik Fr , des

Dichteverhältnisses $\frac{\rho_F}{\rho_L}$ sowie der Beladung μ , der Stosszahl Sz , die [Kus04] mit Gleichung (2.1.1) beschreibt, und des mechanischen Haftreibungsbeiwertes λ_R das Ergebnis einer

Dimensionsanalyse für die pneumatische Dünnstromförderung formuliert, indem er $S_z \cdot \lambda_R$ wegen ihrer linearen Abhängigkeit als eine dimensionslose Kenngröße zusammengefasst hat. Der hierbei verwendete mechanische Haftreibungsbeiwert ist von [Szi87] als $\lambda_R = \tan(\varphi)$ ermittelt worden. Es wurde eine Schicht Fördergut auf eine Platte gegeben und der Winkel φ gemessen, bei dem die Fördergutschicht sich zu bewegen begann. Die Grenze zwischen der Anhaftung des Materials an der Platte und der beginnenden Bewegung ist der mechanische Haftreibungsbeiwert λ_R .

Aus den von [Szi87] gefundenen Pi-Faktoren gleichbedeutend mit den vorhergehend beschriebenen dimensionslosen Kennzahlen kann für den Strähnen-/Pfpfenbereich ein weiteres aussagekräftiges Fundamentalsystem wie folgt gebildet werden, indem mit $[S_z \cdot \lambda_R]$ und $\left[\frac{d_{50}}{D}\right]$

das Förderzeitenverhältnis $\left[\frac{t_L}{t_F}\right] = [S_z \cdot \lambda_R] \cdot \left[\frac{d_{50}}{D}\right]^{-2}$ beschrieben werden kann, siehe Notation.

Dieses Förderzeitenverhältnis ist über Gleichung (5.3.4) mit einem Prozessparameter beschreibbar.

Auf diese Weise lässt sich der Druckverlustbeiwert λ_{tot} für den Strähnen-/Pfpfenbereich nach [Szi90] ebenso mit folgender Exponentialfunktion (Gleichung (3.6)) bestimmen

$$\lambda_{tot} = Fr^a \cdot \mu^b \cdot \left(\frac{d_{50}}{D}\right)^c \cdot \left(\frac{\rho_F}{\rho_L}\right)^d \cdot \left(\frac{t_L}{t_F}\right)^e \quad (3.6)$$

Das Einsetzen der Gleichung (3.6) in Gleichung (3.1) ergibt Gleichung (3.7) mit derselben Gültigkeit der Dimensionshomogenität wie Gleichung (3.1).

$$\frac{dp}{dL} = \mu \cdot \left(\left(\frac{v_0^2}{D \cdot g} \right)^a \cdot \mu^b \cdot \left(\frac{d_{50}}{D} \right)^c \cdot \left(\frac{\rho_F}{\rho_L} \right)^d \cdot \left(\frac{t_L}{t_F} \right)^e \right) \cdot \frac{v_0^2}{D} \cdot \rho_L \cdot 0,5 \cdot \mu^f \quad (3.7)$$

Durch Umstellung von Gleichung (3.7) folgt Gleichung (3.8).

$$\frac{dp}{dL} = \mu^{(1+b+f)} \cdot v_0^{(2a+2)} \cdot d_{50}^c \cdot D^{(-a-c-1)} \cdot \rho_F^d \cdot \rho_L^{(1-d)} \cdot \left(\frac{t_L}{t_F} \right)^e \cdot g^{-a} \cdot 0,5 \quad (3.8)$$

Unter Verwendung des Gaußschen Eliminationsverfahrens können die Exponenten aus Gleichung (3.6) berechnet werden. Es handelt sich hierbei um reelle Zahlen wie die Exponenten aus Gleichung (3.8). Durch Umformen der Gleichung (3.8) folgt in Anlehnung an Gleichung (3.6)

$$\frac{dp}{dL} = Fr^\alpha \cdot \mu^\beta \cdot \left(\frac{d_{50}}{D}\right)^\gamma \cdot \left(\frac{\rho_F}{\rho_L}\right)^\delta \cdot \left(\frac{t_L}{t_F}\right)^\varepsilon \cdot 0,5$$

Für die Gleichungen des mathematischen Modells ab Gleichung (3.1) sind:

$$\frac{dp}{dL} = \text{Druckverlust bezogen auf die Förderstreckenlänge in } (N/m^2)/m$$

μ = Beladung

S_z = Stosszahl

φ = Winkel der Platte zur Ebene während der Haftreibungsversuche aus [Szi87] in *grad*

λ_R = mechanischer Haftreibungsbeiwert

λ_L = Luftreibungsbeiwert

λ_F = Feststoffreibungsbeiwert

λ_{tot} = Gesamtreibungsbeiwert

$\overline{v_L}$ = mittlere Geschwindigkeit des Fördermediums in m/s

v_0 = über die Förderstrecke gemittelte Leerrohrgeschwindigkeit in m/s

v_e = Leerrohrgeschwindigkeit am Ende der Förderstrecke in m/s

D = Förderleitungsinwenddurchmesser in m

g = Erdbeschleunigung in m/s^2

L = Förderstreckenlänge in m

p_a = Druck am Anfang der Förderstrecke in N/m^2

p_e = Druck am Ende der Förderstrecke in N/m^2

ρ_L = über die Förderstrecke gemittelte Dichte des Fördermediums in kg/m^3

ρ_F = Dichte des Fördergutes in kg/m^3

$Fr = \frac{v_0^2}{D \cdot g}$ = Froudezahl

d_{50} = mittlerer Fördergutpartikeldurchmesser bei 50% der Rückstandssummenkurve R
der Korngrößenanalyse des Fördergutes in m

$a, b, c, d, e, f, \alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ = reelle Zahlen

(t_L/t_F) = für die pneumatische Förderung charakteristisches Förderzeitenverhältnis mit:

t_L = mittlere Zeitspanne zwischen zwei aufeinander folgenden Fördergutpfropfen bzw.
-strahlen in s

t_F = mittlere Zeitspanne eines Fördergutpfropfens bzw. einer Fördergutsträhne in s

Mit den gewonnenen Messwerten kann unter Verwendung dieses mathematischen Modells die gültige Druckverlustgleichung (3.1) für den untersuchten Bereich der Strahlen-/Pfpfenförderung berechnet werden, indem zunächst λ_{tot} mit Gleichung (3.2) errechnet wird. Hiernach sind mit Gleichung (3.6) die Exponenten a bis e mit dem Gaußschen Eliminationsverfahren bestimmbar. Nach Umstellung von Gleichung (3.7) ist mit einem Trend der Exponent f ermittelbar. Für eine solche Modelluntersuchung sind 5 Messpunkte derselben Fördergutmassenstromkategorie und desselben Förderzustandes zur Bestimmung der 5 Variablen a bis e erforderlich, wie in Abschnitt 7.2.2 durchgeführt.

4 Versuchsaufbau

4.1 Wahl des Förderstreckenverlaufs, des Fördergutes und des Förderstreckenmaterials

Bei der für die Versuche verwendeten Anlage zur pneumatischen Förderung von Quarzsand handelt es sich um eine für die vorliegende Arbeit konstruierte Pilotanlage. Der Aufbau und Verlauf der Förderleitung ist der existierenden und in Betrieb befindlichen Anlage am Hochofen der Dillinger Hütte nachempfunden.

Die Versuchsanlage im Institut für Metallurgie besitzt im Gegensatz zur Anlage in Dillingen einen Druck- und einen Vorratsbehälter, um das Fördermedium stationär, also im Kreis, fördern zu können. Da ein Schwerpunkt dieser Arbeit die visuelle Betrachtung und Beurteilung der verschiedenen Förderzustände ist, musste eine Förderstrecke geschaffen werden, die es ermöglicht, das Fördergut zu jeder Zeit, an jeder Stelle und in jedem Förderzustand beobachten zu können. Diese Überlegung führte zu der Entscheidung, einen transparenten, gewebeverstärkten PVC-Schlauch mit einem Innendurchmesser von 13mm und einer Wandstärke von 3,5mm zu verwenden, der die geforderten Kriterien zulässt. Somit ist es möglich, an jeder Stelle der Förderstrecke den aktuellen Förderzustand kontinuierlich beurteilen zu können.

Der in der Praxis verwendete Kohlenstaub findet in der Pilotanlage keine Anwendung, da der Kohlenstaub schmiert, sich an den Schlauchinnenseiten anlagert und die Transparenz des Schlauches stark herabsetzt. Es musste ein Fördermedium gewählt werden, welches ähnliche Eigenschaften wie Kohlenstaub hat, jedoch ohne die störenden Eigenschaften wie z.B. die Schwärzung der Innenseite der Förderleitung. Die Entscheidung fiel somit auf Quarzsand. Dieser ist hinsichtlich seiner mechanischen Eigenschaften wie Schüttungsverhalten, Fluidisierung, der Rieselfähigkeit, seiner Homogenität und der Gasdurchströmung dem Kohlenstaub sehr gut vergleichbar. Zudem kann Luft als Fördermedium genutzt werden, was sonst aus Explosionsschutzgründen nicht möglich ist.

4.2 Beschreibung der Pilotanlage

Die relevanten Bauteile der Versuchsanlage (s. Abbildung 4.2-1) sind der Druckbehälter, die eigentliche Förderstrecke, der Vorratsbehälter, sowie die Druckschleuse zwischen dem Vorrats- und dem Druckbehälter.



Abbildung 4.2-1: Komplettansicht der Pilotanlage

Bei dem Druckbehälter handelt es sich um einen s. g. Fluidisierer, einem Zylinder, der aus Stahl gefertigt ist. Die Zufuhr des Fördermediums erfolgt über eine Öffnung im Deckel, der Auslauf befindet sich an der Spitze des nach unten konisch zulaufenden Teils des Behälters. Der Druckbehälter besitzt zudem zwei Fluidisierungszone. Eine obere, die im mittleren Bereich des Druckbehälters installiert ist und eine untere Zone, direkt am Ausgang und unmittelbar über dem Injektor. Diese Fluidisierungszone bestehen aus vier bzw. acht in den Behälter installierten Düsen und dienen dazu, den Sand im Druckbehälter von unten nach oben mit Luft zu durchströmen. So wird verhindert, dass der Sand zusammenbacken kann und seine Rieselfähigkeit verliert. Diese Rieselfähigkeit des Sandes ist Voraussetzung für das pneumatische Fördern.

Zur Bestimmung der Druckverhältnisse im Innern des Druckbehälters ist auf der Oberseite des Behälters ein Manometer angebracht. Zum Schutz vor Verunreinigungen durch den Sand bzw. Staub, ist dem Manometer ein Filter [Rie97] vorgeschaltet.

Betrieben wird das pneumatische Fördersystem mit Druckluft, die mit einem Druck von max. 8bar zur Verfügung steht. Da die Versuche mit Drücken zwischen 1,5bar und 2,5bar gefahren werden, ist zur Einstellung der benötigten Drücke ein Druckminderer notwendig. Dieser ist auf dem Bedienpult zur manuellen Steuerung der Anlage montiert. Hier befinden sich ebenfalls zwei Manometer, je eines für die obere und untere Fluidisierungszone, sowie das Manometer für die Steuerung der Fördergaszuführung. Vor jedem dieser Manometer ist ein Regelventil installiert. Diese Ventile sind notwendig, um den zugeordneten benötigten Druck an der betreffenden Stelle genau einregeln zu können. Auf der Oberseite des Druckbehälters befindet sich zudem noch ein Überdruckventil, welches bei Drücken über 6bar öffnet und den Überdruck ablässt und so die Anlagenteile vor Schäden schützt.

Der Übergang vom Druckbehälter in die Förderstrecke erfolgt unter Verwendung eines Injektors, Abbildung 4.2-2 rechts.



Abbildung 4.2-2: Injektoren (rechts optimierte Variante)

In diesem Injektor werden das Fördergut und die Druckluft aus zwei Leitungen in eine Leitung zusammengeführt und das Fördergut-Luftgemisch anschließend in das Fördersystem eingeleitet [Pos06].

Über dem Druckbehälter ist der Vorratsbehälter angebracht. Hierbei handelt es sich ebenfalls um einen aus Stahl gefertigten zylindrischen Behälter. Im Innern des Behälters ist der untere Teil konisch ausgelegt, um zu erreichen, dass das gesamte Fördergut während des Betriebes ständig zur Austrittsöffnung nachrutschen kann. Dieser Vorratsbehälter ist nicht druckbeaufschlagt. Druckluft, die über die Förderleitung bzw. über das Verbindungsrohr zwischen Druck- und Vorratsbehälter in den Druckbehälter gelangt, wird über eine Auslassöffnung wieder abgeführt. Aus Gründen der Sicherheit ist jedoch ein Manometer und ein Überdruckventil am Vorratsbehälter angebracht, um bei etwaigen Störungen im System sofort entsprechende Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden einleiten zu können.

Zwischen dem Druck- und dem Vorratsbehälter ist das Verbindungsrohr, Abbildung 4.2-3, positioniert. Hierbei handelt es sich um ein aus Stahl bestehendes Rohr, mit einem Puffer in Form eines Kegelstumpfes in der Mitte. In diesem Rohr sind an beiden Enden zwei Absperrblasen, Abbildung 4.2-4, welche auf einem Flansch montiert sind, angebracht.



Abbildung 4.2-3: Verbindungsrohr

Diese Absperrblasen sind aus Schlauchstücken aus Silikon-Kautschuk von je 170mm Länge, 30mm Innendurchmesser und 4mm Wandstärke gefertigt. Die Shore-Härte beträgt 50 bis 60 [Ros05]. Die Absperrblasen besitzen auf der einen Seite einen Blindstopfen, der sie abdichtet und auf der Eingangsseite einen Stutzen mit einem Gewinde, mit welchem sie in einen Flansch geschraubt werden. An den Übergangsstellen, an denen der Blindstopfen sowie der Stutzen in den Naturkautschukschlauch ragen, sind sie mit einem gewobenen 1,5mm starken Polyamidfaden, fest umwickelt. Dieser Faden verhindert das Abrutschen des Schlauches von den beiden Metallstutzen während des Betriebes unter Druckbeaufschlagung. Zusätzlich ist der Faden mit einer Schicht aus Zweikomponentenkleber [FSE03] gegen Verschleiß und Abrasion umhüllt.



Abbildung 4.2-4: Absperblasen

Der Flansch, Abbildung 4.2-5, in dem die Absperblase verschraubt ist, ist mit einem Spalt versehen, der 345° eines Kreisbogens entspricht. Dieser Spalt hat eine Breite von 12mm. Durch diesen Spalt strömt im Förderbetrieb das Fördergut Sand. Der Steg in den verbliebenen 15° Grad des Flansches ist mit einer Bohrung in Längsrichtung versehen. Durch diese Bohrung strömt das Wasser, mit dem die Absperblasen betrieben werden, hinein und wieder hinaus.



Abbildung 4.2-5: Flansch zur Aufnahme der Absperblasen

Durch das intermittierende Befüllen und Entleeren dieser Absperblasen dient das Verbindungsrohr als Schleuse zwischen dem druckbeaufschlagten Fluidisierer und dem drucklosen Vorratsbehälter, Abbildung 4.2-6. Ein zwischen dem Vorratsbehälter und dem Verbindungsrohr eingebauter Kompensator dient der Kraftentkopplung des druckbeaufschlagten Anlagenteils zur störungsfreien Durchführung der Gewichtsmessung im Förderbetrieb.

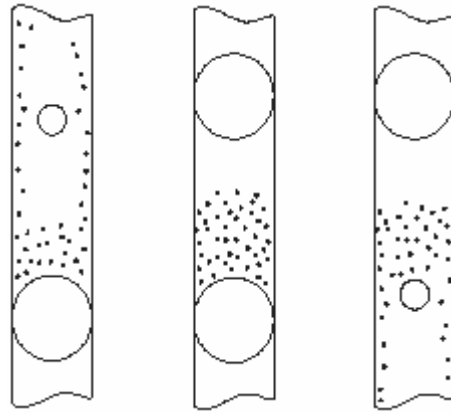


Abbildung 4.2-6: Funktion der Absperrblasen

Die Wasserzu- und -abführung erfolgt über vier elektromagnetische Ventile, siehe Abbildung 4.2-7, je zwei für die Wasserzu- und -abführung. Diesen Ventilen sind zur Kontrolle ein Manometer, sowie ein Druckminderer vorgeschaltet, der den Wasserdruck von 6 bar auf 4 bar reduziert. Geschaltet werden diese Ventile über eine Steuerung, welche in LabView 7.1 generiert wurde.



Abbildung 4.2-7: Elektromagnetisches Ventil

Nach dem Druckbehälter und dem daran angeschlossenen Injektor ist die Förderleitung installiert. Diese besteht aus dem o. g. transparenten, gewebeverstärkten PVC-Schlauch. Die Länge dieser Förderstrecke beträgt 20m. Die Förderstrecke ist vertikal auf einem Gewebe aus Maschendraht angebracht, welches über Ständer mit der Wand in der Versuchshalle verbunden ist. Um statische Aufladungen durch den sich in der Förderleitung bewegendes Sand zu vermeiden, ist das System geerdet [Lüt93]. Der Förderstreckenverlauf ist dem in Dillingen am Hochofen nachempfunden. So besitzt die Förderstrecke steigende Leitungsabschnitte, horizontale Strecken, 90°-Radien, einen 180°-Radius, sowie fallende Streckenverläufe. Gleich zu Beginn der Förderstrecke ist der erste Druckmessumformer (DMU1) angebracht. Am Ende der Förderstrecke unmittelbar vor der Einleitung in den Vorratsbehälter, befindet sich der zweite Druckmessumformer (DMU2). Mit Hilfe dieser DMU ist es möglich, die Druckdifferenz $\Delta p/L$ über den gesamten Verlauf der Förderstrecke L zu erfassen.

Nach dem ersten DMU ist hinter dem Drahtgeflecht ein Lichtschirm angebracht. An seiner Frontseite befindet sich eine Milchglasscheibe. Im Innern befinden sich Neonröhren mit einer hohen Lichtstärke. Aufgrund der Milchglasscheibe und der starken Leuchtstoffröhren entsteht ein gleichmäßiges, sehr helles Licht. An der Frontseite des Schirmes ist der Gewebeschlauch angebracht. Mit dieser Lichtquelle im Hintergrund ist es möglich, dass sich durch den

transparenten Schlauch bewegende Fördergut genau zu beobachten. Im weiteren Verlauf der Förderstrecke sind an den steigenden und fallenden Leitungen vier Aufnahmen mit je einem Dehnungsmessstreifen (DMS) angebracht. Mithilfe der DMS können Aussagen zum jeweiligen Druckzustand gemacht werden. Hinter den DMS1 und DMS3 sind jeweils ein Lichtspannungswandler (LSW) appliziert. Jeder LSW gibt Aufschluss darüber, ob zum aktuellen Zeitpunkt der von ihm betrachtete Leitungsquerschnitt mit Fördergutpartikeln gefüllt ist oder ob weniger bis keine Fördergutpartikel den Leitungsquerschnitt passieren. Ihre Detektion der Fördergutpartikel lässt somit Rückschlüsse auf den Förderzustand in diesem Leitungsabschnitt zu.

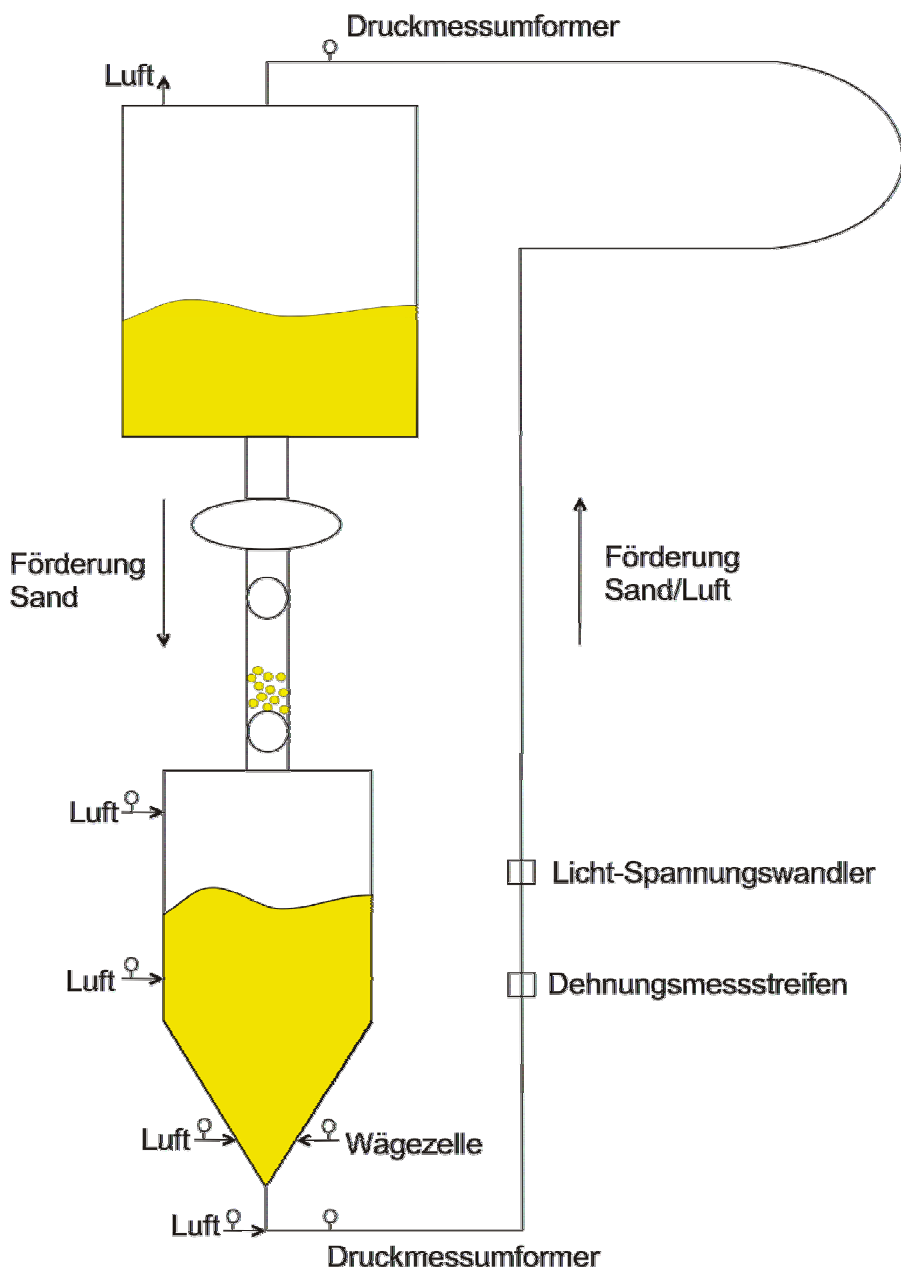


Abbildung 4.2-8: Vereinfachtes Prinzip der Anlage – Förderkreislauf

Die Förderleitung endet im Vorratsbehälter. Hier trennen sich im Förderbetrieb der Sand, welcher dem Förderkreislauf, Abbildung 4.2-8, wieder zugeführt wird und das zum Fördern benötigte Fördermedium Luft. Die Luft gelangt zunächst in einen Filter [Man09], der sie vom Staub befreit. Daran angeschlossen ist ein Massendurchflussmesser (MDM). Danach verlässt die Luft das System über die Auslassöffnung. Mit einem MDM, der am Anfang der Fördergasleitung installiert ist, wird der zum Fördern benötigte Gesamtdurchfluss erfasst.

4.3 Regelung, Steuerung und Datenerfassung

Über LabView 7.1 werden alle Sensoren und nicht von Hand betriebenen Aktoren ausgelesen bzw. angesteuert. Hierfür wurde eine PC-Steckkarte und zwei SC-2345 Signal Conditioning Connector Blöcke von National Instruments mit analogen Eingangsmodulen zur Messwerterfassung sowie Relais-Ausgangsmodulen zum Schalten der elektromagnetischen Ventile der Wasserzuläufe und -abläufe der Absperrblasen eingesetzt.

In LabView realisiert wurden

- die Steuerung der Absperrblasen
- ein Zweipunktregler zur Aktivierung und Deaktivierung dieser Absperrblasensteuerung
- die Anlagenvisualisierung
- eine Datenspeicherung, die von Hand gestartet und gestoppt werden kann

Die Datenspeicherung in Textdateien ist manuell start- und stoppbar, damit während des Versuchs gezielt Daten bei eingestelltem Förderzustand aufgenommen werden können. Die Erfassung der Anlagendaten erfolgt mit einer Abtastrate von 5 Hz. Die während 20 Sekunden aufgenommenen Anlagendaten stellen jeweils die Datenbasis für eine Punktmessung dar, die sowohl für die Erstellung des Förderzustandsdiagramms als auch für die Verschleißmessungen Verwendung findet. Für die Punktmessung werden die Mittelwerte der Daten eines 20-Sekunden-Intervalls im Messprogramm selbst bereits berechnet und die Druckdifferenz pro Förderstreckenlänge, die Fördergas-Geschwindigkeit, der Fördergut-Massenstrom und die Beladung visualisiert. Die Skalierung der Wägezelle wurde vor Versuchsbeginn im Messprogramm gemäß dem im Versuch angestrebten Anlagendruck gewählt.

Die Steuerung der Absperrblasen läuft gemäß Abbildung 4.3-1 in 8 aufeinander folgenden Phasen ab.

Phase 0

Beide Absperrblasen (unten und oben) sind mit Wasser gefüllt nach einer zu ihrem Auffüllen ausreichend langen Zeit. Hierfür sind die Ventile V1 und V3 angesteuert und somit die Wasserzuläufe der Absperrblasen offen und die Ventile V2 und V4 sind stromlos und damit die Wasserabläufe geschlossen. Hiermit soll das unkontrollierte Ausströmen des Fördermediums aus dem Druckbehälter über die Schleuse in den Vorratsbehälter und ein hierdurch hervorgerufener Druckverlust im Vorratsbehälter verhindert werden. Außerdem sollen die bestehenden, für die Förderung ausschlaggebenden Druckverhältnisse, im Druckbehälter erhalten bleiben. Hiermit soll erreicht werden, dass das am Förderstreckenbeginn eingesetzte Fördermedium bei geschlossener Schleuse, d. h. im Messbetrieb, ausschließlich über die Förderstrecke strömt, wodurch die Beladungsergebnisse aussagekräftig und reproduzierbar werden. Sowohl für den Messbetrieb als auch für den Schleusenbetrieb gilt der Zustand, der über diese Phase erreicht wird als sicherer Zustand.

Phase 1

In dieser Phase erfolgt die Vorbereitung zum Öffnen der unteren Absperrblase, indem ein weiterer Zulauf von Wasser in die untere Absperrblase durch das Schließen des Ventils V3 unterbunden wird.

Phase 2

In Phase 2 rieselt das Fördergut aus der Schleuse, nachdem durch das geöffnete Ventil V4 das Wasser aus der unteren Absperrblase abgeflossen ist.

Phase 3

In dieser Phase rieselt weiter das Fördergut aus der Schleuse und der Wasserablauf der leeren unteren Absperrblase wird geschlossen (Ventil V4 stromlos und damit geschlossen).

Phase 4

Siehe Phase 0.

Phase 5

Diese Phase ähnelt der Phase 1, findet jedoch an der oberen Absperrblase statt. In dieser Phase erfolgt die Vorbereitung zum Öffnen der oberen Absperrblase, indem ein weiterer Zulauf von Wasser in die obere Absperrblase durch das Schließen des Ventils V1 unterbunden wird.

Phase 6

Diese Phase ähnelt der Phase 2, bezieht sich jedoch auf das Befüllen der Schleuse. In Phase 6 rieselt das Fördergut in die Schleuse, nachdem durch das geöffnete Ventil V2 das Wasser aus der oberen Absperrblase abgeflossen ist.

Phase 7

Diese Phase ähnelt der Phase 3, bezieht sich jedoch auf das Beenden des Befüllens der Schleuse. In dieser Phase rieselt weiter das Fördergut in die Schleuse und der Wasserablauf der leeren oberen Absperrblase wird geschlossen (Ventil V2 stromlos und damit geschlossen). Nach Phase 7 beginnt die Phasenabfolge erneut mit Phase 0.

Durch das Umschalten vom Schleusenbetrieb in den Messbetrieb wird die Phasenfolge gestoppt und die Ventilstellung gemäß Phase 0 eingestellt.

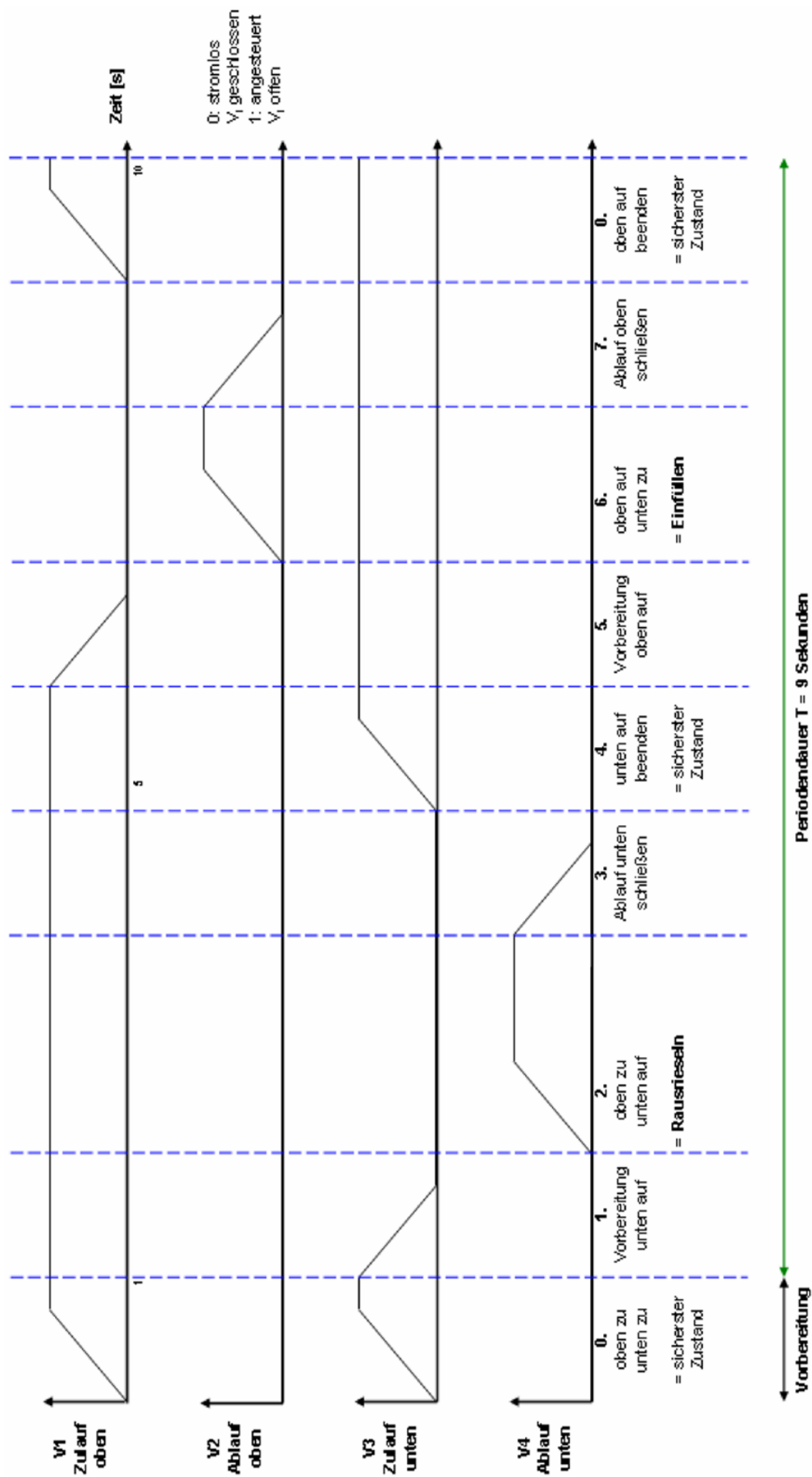


Abbildung 4.3-1: Impuls-Diagramm der Absperblasensteuerung mit Ventilverhalten

Am Zweipunktregler kann eine obere und eine untere Grenze für die noch im Druckbehälter enthaltene Fördergutmasse durch den Nutzer festgelegt werden. Bei Erreichen der unteren Grenze durch den aktuellen Wägezellenmesswert aktiviert der Zweipunktregler die Steuerung der Absperrblasen, wodurch der Sand in Schüben aus dem Vorratsbehälter in den Druckbehälter rieselt bis der aktuelle Wägezellenmesswert die obere Grenze des Zweipunktreglers erreicht. Nun wird die Absperrblasensteuerung durch den Zweipunktregler deaktiviert, d. h. im sicheren Zustand gehalten, so dass nur noch Sand aus dem Druckbehälter gefördert wird. Nun kann sich eine möglichst stabile und kontinuierliche Förderung einstellen. Die Datenerfassung wird danach manuell gestartet. Der Grund für dieses Vorgehen ist, dass somit kein Absperrblasenbetrieb mehr die Wägezellenmesswerte als Störung überlagern und wiederholt Druckverluste im Druckbehälter verursachen kann.

4.4 Messtechnik des experimentellen Aufbaus

Die charakteristischen Kenngrößen des experimentellen Aufbaus und verwendeten Materialien sind

- Förderstreckenlänge $L = 20 \text{ m}$
- Hub $H = 4,32 \text{ m}$
- Anzahl Krümmer $n_{Kr} = 10$
- Fördermedium: Luft
- Förderstreckenmaterial: Transparenter, gewebeverstärkter PVC-Schlauch
- Fördergut: Quarzsand (Details s. Kapitel 5)

Die im Förderstreckenverlauf der Anlage befindlichen 10 Krümmer unterteilen sich dabei in 7 Krümmer mit 90° , einen Krümmer mit 45° und 2 Halbkreise (s. Prozessschema Abbildung 4.4-1).

Das Prozessschema stellt die Hauptkomponenten der Anlage, den schematischen Verlauf der Förderstrecke, sowie die räumliche Anordnung der Sensoren und Aktoren im Fördersystem dar. Tabelle 4.4-1 listet die Messstellen in Förderrichtung auf.

Messstelle	Messgröße	Bezeichnung	Notation im Text
M1	Fördergasdurchfluss	Massendurchflussmesser3	MDM3
M2	Fluidisierungsdruck	Manometer unt. Fluidisierungszone	
M3	Fluidisierungsdruck	Manometer obere Fluidisierungszone	
M4	Fluidisierungsdruck	Manometer zusätzliches Fördergas	
M5	Kontrolldruck	Manometer Druckbehälter	
M6	Gewichtskraft Vorratsbeh.	Wägezelle	WZ
M7	Fördergasdruck	Druckmessumformer1	DMU1
M8	Druck	Dehnungsmessstreifen1	DMS1
M9	Partikelmenge	Licht-Spannungswandler1	LSW1
M10	Druck	Dehnungsmessstreifen2	DMS2
M11	Partikelmenge	Licht-Spannungswandler2	LSW2
M12	Druck	Dehnungsmessstreifen3	DMS3
M13	Druck	Dehnungsmessstreifen4	DMS4
M14	Fördergasdruck	Druckmessumformer2	DMU2
M15	Fördergasdurchfluss	Massendurchflussmesser1	MDM1
M16	Kontrolldruck	Manometer Vorratsbehälter	
M17	Kontrolldruck	Manometer Wasserzufuhr	

Tabelle 4.4-1: Liste der Messgrößen

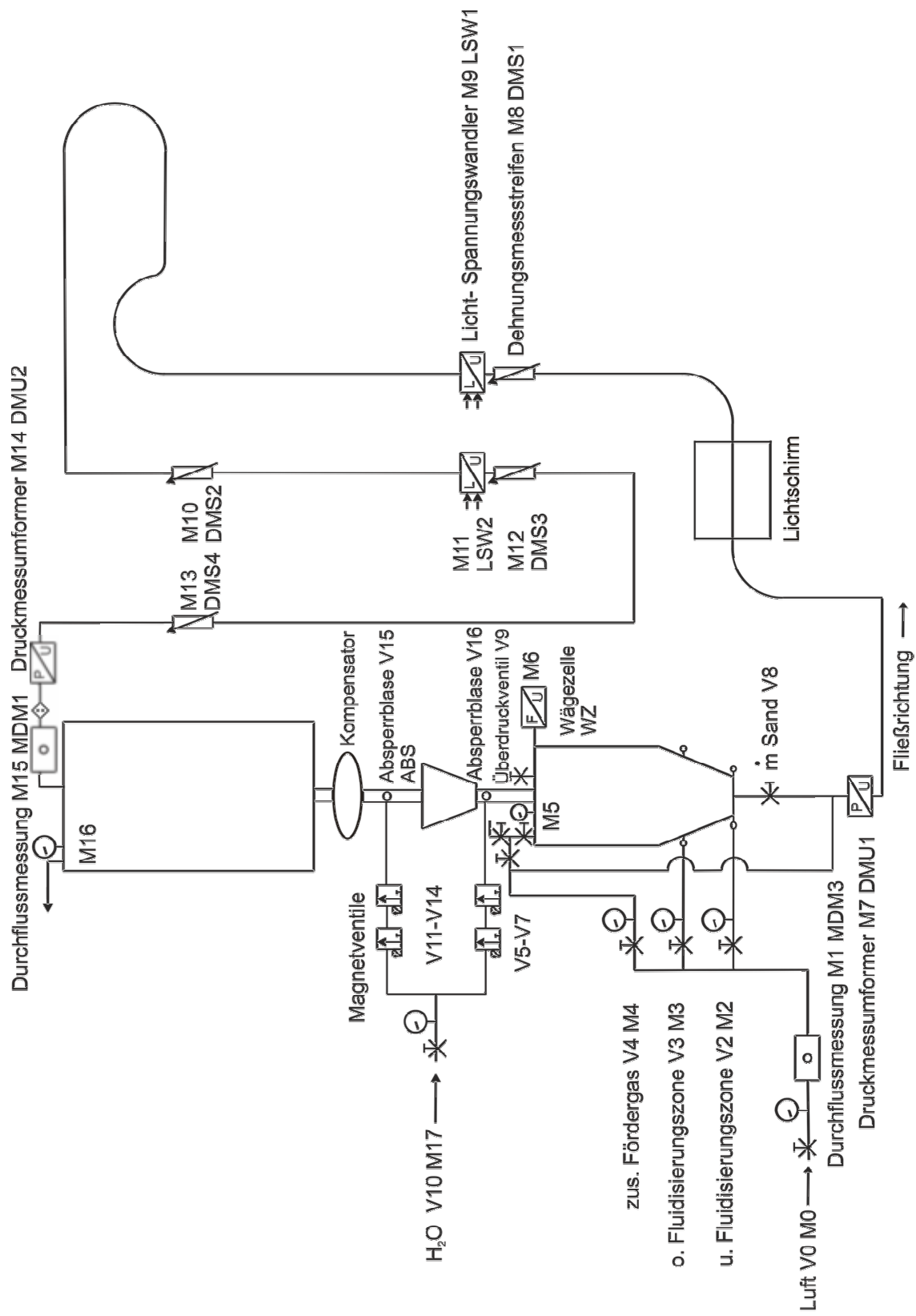


Abbildung 4.4-1: Prozessschema des experimentellen Aufbaus

4.4.1 Funktionsweise Massendurchflussmesser für Luft

Mithilfe von 2 Massendurchflussmessern (MDM) wurden die Volumenströme des Fördermediums Luft zu Beginn und am Ende der Förderstrecke ermittelt, Abbildung 4.4.1-1.

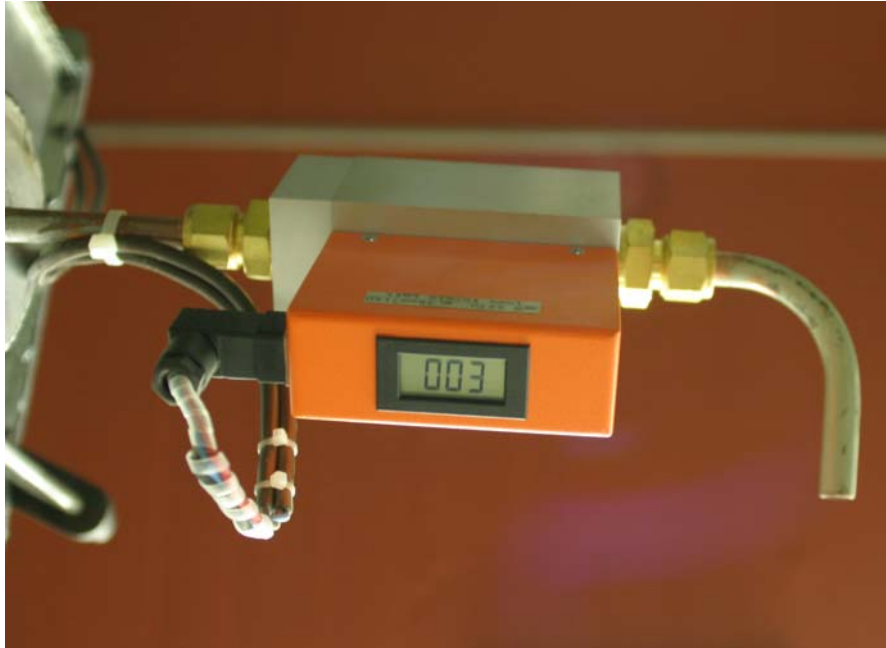


Abbildung 4.4.1-1: MDM am Ende der Förderstrecke

Gemäß [Kob01] basiert die Funktion der verwendeten MDM auf dem Prinzip des Wärmetransportes. Der zu messende Fördergasstrom wird hierfür im MDM in zwei Teilströme unterteilt, Abbildung 4.4.1-2. Ein Teil der Gasmenge strömt durch das Laminar-Flow-Bypasselement, über dem sich eine Druckdifferenz aufbaut, die wiederum einen Teilstrom des Fördergases durch das Messrohr fließen lässt. Am Messrohr befinden sich zwei Widerstandstempertur-Detektoren (RTD-Sensoren) im Fördergasstrom. Das strömende Fördergas transportiert Wärme, wodurch eine Temperaturdifferenz detektierbar ist. Die einzelnen Gasmoleküle im Luftstrom transportieren dabei jeweils eine spezifische Wärmemenge, so dass die Temperaturdifferenz linear proportional zum Luftmassenstrom ist.

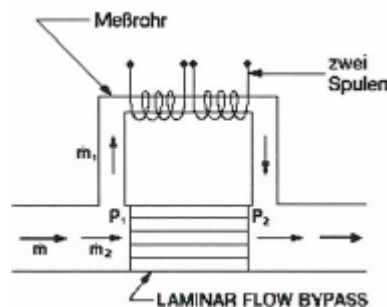


Abbildung 4.4.1-2: Schematische Darstellung eines Massendurchflussmessers aus [Kob01]

Die im MDM integrierte Messelektronik wandelt die gemessene Temperaturdifferenz in eine Anzeige in Normlitern pro Minute und ein Ausgangssignal von z. B. 4 bis 20mA um. Mit Normlitern pro Minute wird dabei der Volumenstrom des Gases im Normzustand beschrieben. Der Normzustand wird in Deutschland als Bezugszustand verwendet (siehe DIN1343 „Referenzzustand, Normzustand, Normvolumen“). Der hierfür eingesetzte Druck von 1,01325bar und die Temperatur von 273,15K sind die Normwerte.

Nach [Kob01] beträgt die für diese MDM typische Ansprechzeit 6s, damit bei zwei aufeinander folgenden Messungen mit 25% und 100% des Messbereichsendwertes 98% des Momentanwertes zur Anzeige gebracht werden können. Die Umrechnung auf Betriebsvolumenstrom erfolgt auf Basis der Angaben im Kalibrierschein [Kob09].

4.4.2 Druckmessumformer

In der Versuchsanlage wurde am Anfang und am Ende der Förderstrecke jeweils ein Druckmessumformer (DMU) zur Erfassung des Relativdrucks installiert, Abbildung 4.4.2-1. Somit ist an diesen Förderstreckenorten bei bekanntem Umgebungsdruck der jeweilige Absolutdruck in der Anlage verfügbar. Alle erzielten Messdaten werden über zwei SC-2345 Signal Conditioning Connector Blöcke von National Instruments mit analogen Eingangsmodulen und einer PC-Steckkarte aufgenommen und für die späteren Auswertungen aufgezeichnet. Die während der pneumatischen Förderung mit den Druckmessumformern erfassten Momentanwerte des Relativdrucks bilden mit die Grundlage für die Berechnung der Fördergasdichte, des Gasvolumenstroms und der Fördergasgeschwindigkeit an diesen Förderstreckenorten [Sta06]. Wird die Anlage betrieben, baut sich im System ein Druck auf, der, je nach Förderzustand, bis zu 2,5 bar betragen kann.



Abbildung 4.4.2-1: DMU mit Adapter und Halterung

Bei einem Druckmessumformer handelt es sich um einen Sensor, der ein Drucksignal erfasst und eine Elektronik, über die dieses Signal in ein definiertes digitales Ausgangssignal umgewandelt und ausgegeben wird, Abbildung 4.4.2-2. Unterschieden wird die Erfassung von Absolutdruck und Differenzdruck. In der hier beschriebenen Pilotanlage messen die DMU den im Fördersystem anstehenden Überdruck relativ zum Umgebungsdruck als Differenzdruck. Das hierbei generierte elektrische Signal verändert sich proportional zum Druck und kann entsprechend ausgewertet werden.

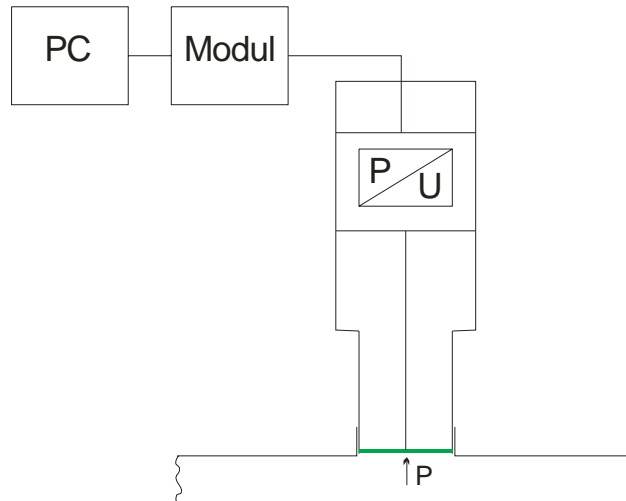


Abbildung 4.4.2-2: Aufbau Druckmessumformer

Das Kernstück des DMU ist eine aus zwei Kammern bestehende Druckmessdose, die eine Membranfeder aus Berylliumbronze besitzt. Diese Membranfeder wird entsprechend der vorherrschenden Druckdifferenz ausgelenkt. Die Messung der Auslenkung geschieht berührungslos unter Anwendung eines induktiven Wegaufnehmers.

Nach [WIK06] sind alle Teile des DMU, die mit dem Messstoff in Berührung kommen, aus Chrom-Nickelstahl gefertigt. Der verwendete DMU besitzt eine frontbündige Membrane. Diese Bauform eignet sich besonders für viskose oder verunreinigte Medien. Diese Verunreinigungen werden hier durch den Sand dargestellt. Die frontbündige Bauweise des DMU verhindert ein Zusetzen des Druckkanals im Innern des DMU. Dies lässt eine störungsfreie Messung im Förderbetrieb zu, da sich keine Sandkörner festsetzen können.

Der genutzte Messbereich liegt während der Versuchsreihen zum pneumatischen Fördern zwischen 1,5 und 2,5 bar. Betrieben werden die DMU hierbei mit einer unregelmäßigen Gleichspannung von 24 Volt.

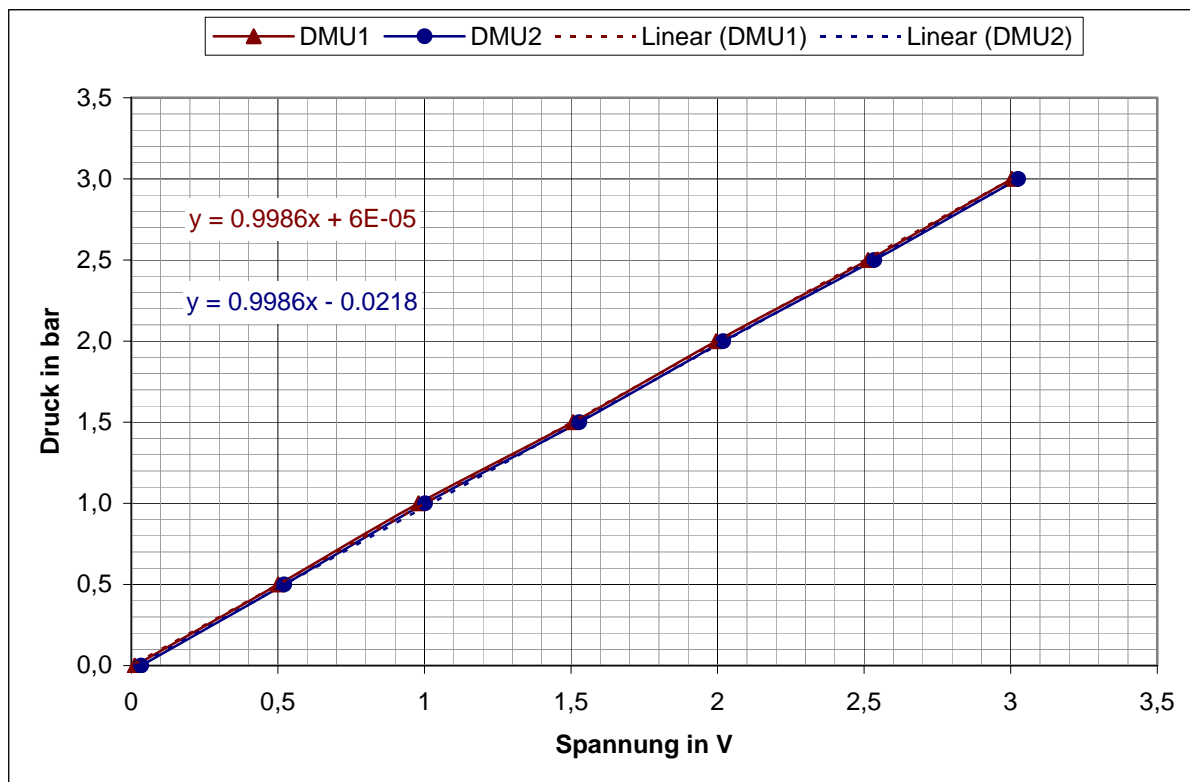


Abbildung 4.4.2-3: Diagramm zur DMU-Skalierung

In LabView wurden gemäß Abbildung 4.4.2-3 die erfassten DMU-Signale vor der Visualisierung und Speicherung in Drücke umgerechnet. Zur Erstellung dieser DMU-Skalierungsgleichungen wurden die Spannungsmesswerte beider DMU mit der Druckanzeige eines kalibrierten Manometers verglichen.

4.4.3 Aufbau und Funktion der Licht-Spannungswandler

Im vertikal steigenden und im vertikal fallenden Streckenabschnitt ist jeweils ein Licht-Spannungswandler (LSW) mit einem Aluminiumhalter an der Förderstrecke der Pilotanlage installiert (s. Abbildung 4.4.3-1). Um Aussagen machen zu können, ob gefördert wird, in welchen Zeitabständen und in welchem Förderzustand aktuell, ist die Verwendung von Licht-Spannungswandlern angezeigt. Sie geben zuverlässig Auskunft zum jeweiligen Füllgrad in der Förderleitung. So sendet die LED ihr Licht durch den transparenten Schlauch zum IR Sensor, der es empfängt. Der Sensor wandelt die Lichtsignale wieder in elektrische Spannung um. Die Signale beider LSW werden über die zwei SC-2345 Signal Conditioning Connector Blöcke von National Instruments mit analogen Eingangsmodulen und einer PC-Steckkarte aufgenommen und für die späteren Auswertungen aufgezeichnet.

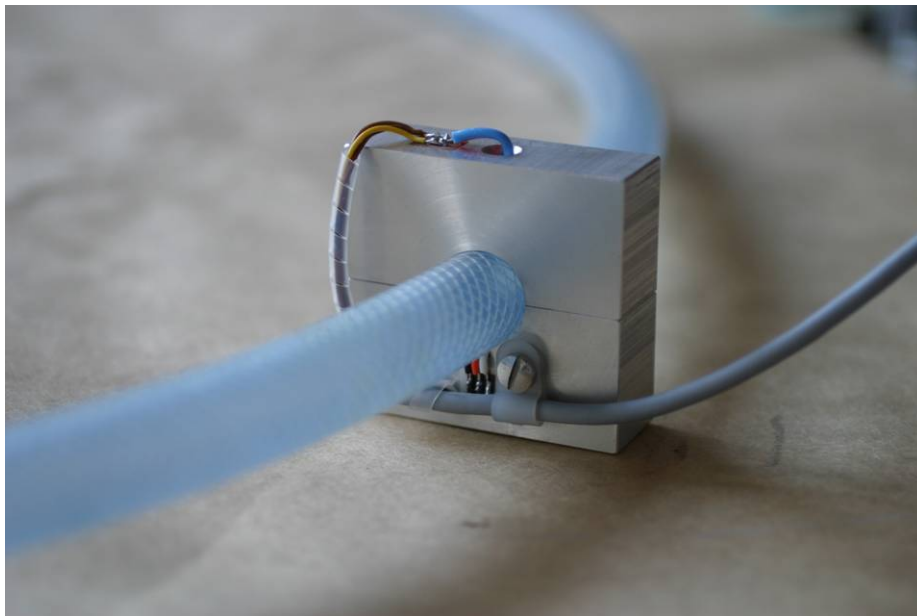


Abbildung 4.4.3-1: IR-LED oben und IR-Sensor unten eingefasst in einer Aluminiumhalterung

Beim Licht-Spannungs-Wandler wird Licht in elektrische Spannung umgewandelt. Die LSW kombinieren eine Sende- mit einer Empfangsdiode, die bezüglich ihrer Wellenlänge aufeinander abgestimmt sind. Die Infrarotlumineszenzdiode vom Typ SFH 485 senden bei 880nm, [Sie99]. Die eingesetzten Empfangsdioden der Serie TSL260 arbeiten im infraroten Bereich bei einer Wellenlänge von 920nm, [TAO00]. Die Sendediode sendet ihr Licht durch den transparenten Schlauch der Förderstrecke der Pilotanlage, siehe Abbildung 4.4.3-1. Die Ausgangsspannung des Empfängers ist direkt proportional zur Lichtintensität des Senders.

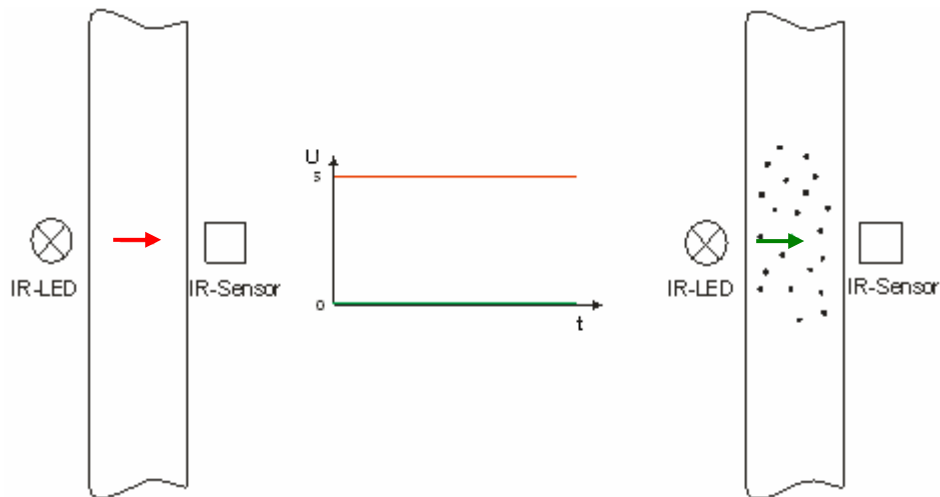


Abbildung 4.4.3-2: Schematische Darstellung eines Licht-Spannungs-Wandlers

Die gegenüberliegend angebrachte Empfangsdiode (s. Abbildungen 4.4.3-1 und 4.4.3-2) liefert bei absoluter Dunkelheit eine Spannung von 3mV bis 10mV. Ist die Helligkeit maximal, so liegt die Ausgangsspannung bei etwa 3V. Der Versorgungsstrom beträgt $900\ \mu\text{A}$ (typisch) und $1600\ \mu\text{A}$ (maximal) bei den verwendeten Empfangsdioden vom Typ TSL 260, [TAO00].

Ist demnach die Förderstrecke am Messort des LSW während einer Messung frei von Fördergutpartikeln, so ist die Lichtintensität am größten. Über eine Skalierung wird ein Signal mit maximalem Ausschlag von 5V generiert. Wird Fördergut transportiert, so variiert die Lichtintensität abhängig vom Förderzustand. Die Lichtintensität am Sensor ist umso geringer, je mehr Fördergutpartikel momentan den LSW passieren, d. h. je höher der momentane Fördergutmassenstrom im betrachteten Förderleitungsabschnitt ist. Bei maximaler Dichtstromförderung wird aus dem ursprünglichen Signal durch Skalierung 0V. Bei der Dünnstromförderung kann ein fast maximaler Ausschlag von 5V erreicht werden, Abbildungen 4.4.3-2 und 4.4.3-3. Die Abbildung 4.4.3-3 zeigt die Momentanwerte eines Licht-Spannungswandlers bei unterschiedlichen Förderzuständen vor dieser Skalierung.

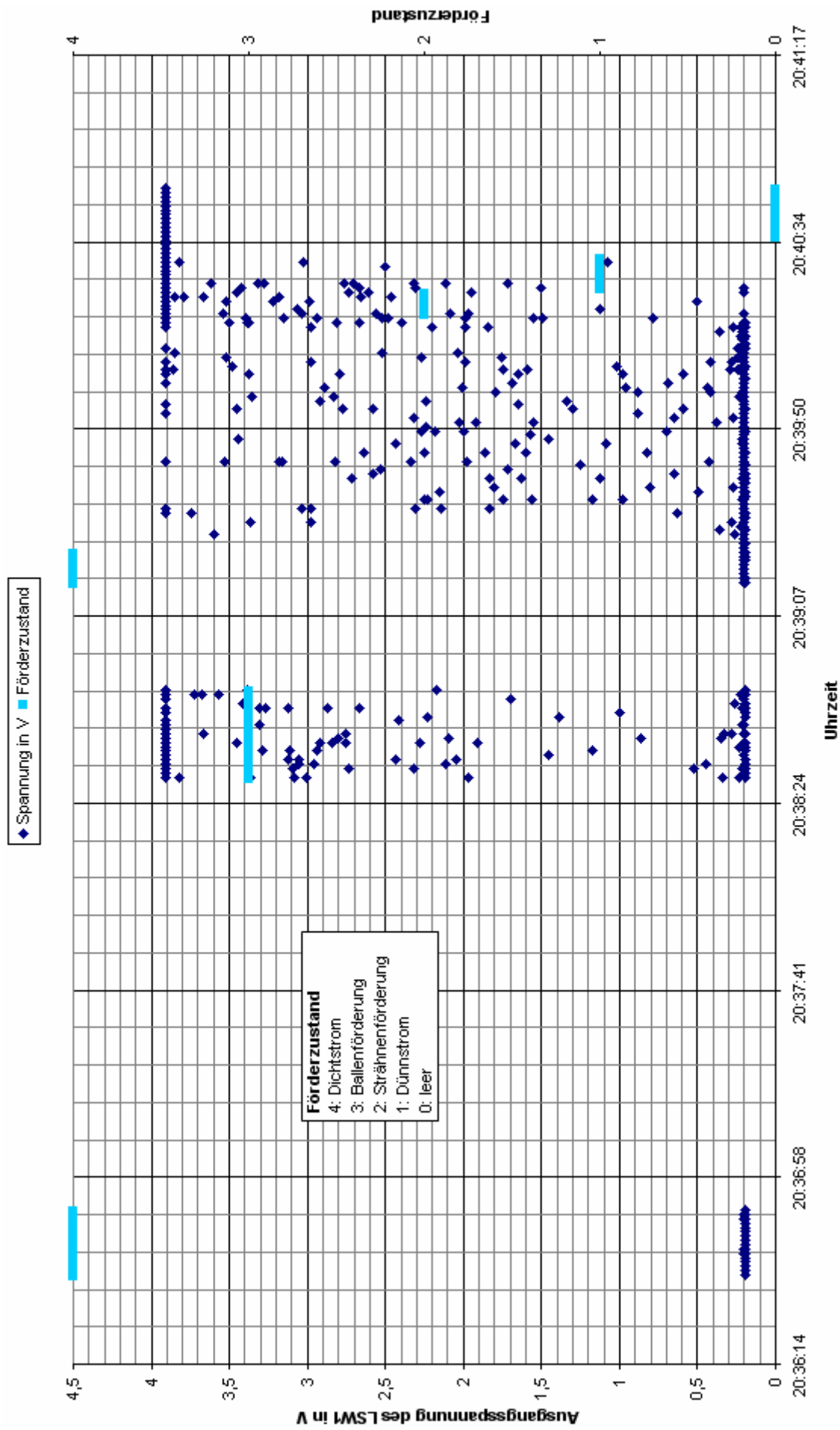


Abbildung 4.4.3-3: LSW-Diagramm mit verschiedenen Förderzuständen

4.4.4 Aufbau und Funktion der Dehnungsmessstreifen

Dehnungsmessstreifen sind Kraftsensoren, die häufig als piezoresistive Metallfolien ausgeführt werden. Ihre Funktion beruht auf einer dehnungsproportionalen Widerstandsänderung. Hiermit sind Zug und Druckkräfte messbar [End95]. Die wirkende Kraft verursacht eine Dehnung des Messdrahtes. Dehnungsbedingt kommt es zu einer Längenänderung, Querschnittsflächenänderung und somit auch zur Widerstandsänderung des Messdrahtes. Dabei sollte der Messdraht möglichst lang und dünn gewählt sein, so dass eine mäanderförmig ausgeätzte Metallfolie auf Isoliermaterial hierfür verwendet wird. Zwischen Dehnung und Widerstandsänderung ist der k-Faktor der Proportionalitätsfaktor. Im elastischen Bereich des Messdrahtmaterials und bei Konstantan darüber hinaus auch bei plastischer Messdrahtverformung ist der k-Faktor konstant.

Es wurden jeweils 2 Dehnungsmessstreifen 1-LY11-3/120A von Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH auf einer Aufnahmescheibe aus Stahl, wie in den Abbildungen 4.4.4-1 und 4.4.4-2 zu sehen, zur Messung der Längs- und Querkräfte senkrecht zueinander angebracht. Sie sind als Vollbrücke verschaltet.

Das Datenblatt [Hot06] beschreibt die verwendeten Dehnungsmessstreifen mit

- Nennwiderstand von $120\ \Omega$
- k-Faktor von 2,02
- Querempfindlichkeit von +0,2%
- $\alpha_{\text{Stahl}} = 10,8 \cdot 10^{-6}\ K^{-1}$
- an Wärmeausdehnungskoeffizienten von Stahl angepassten Temperaturgang

Die Pilotanlage besitzt 4 Dehnungsmessstreifen-Vollbrücken (DMS), die auf Stahlaufnahmescheiben wie in Abbildung 4.4.4-1 am Förderschlauch in den vertikal steigenden und fallenden Förderstreckenabschnitten, wie das Prozessschema 4.4-1 zeigt, angebracht sind.

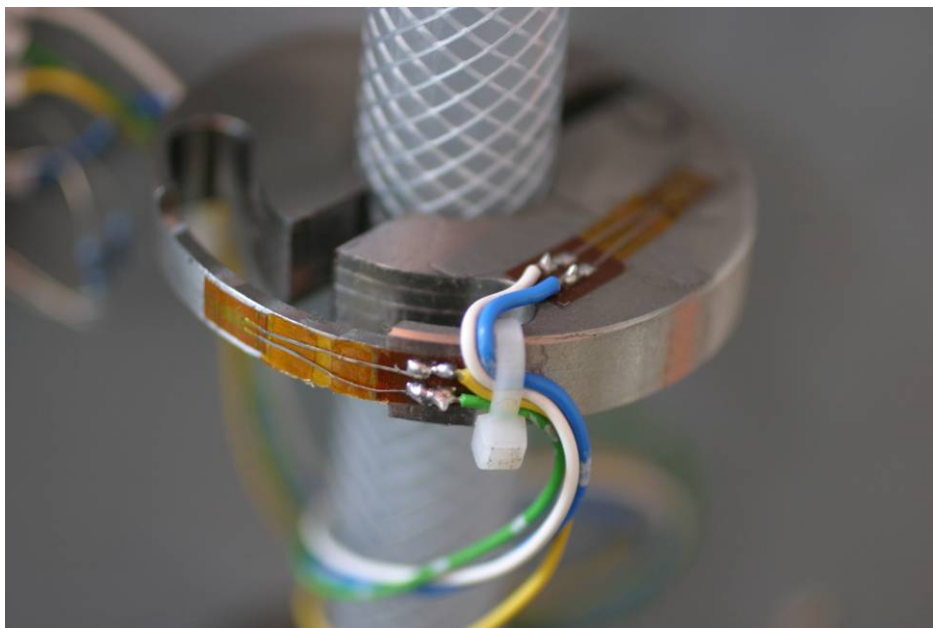


Abbildung 4.4.4-1: Foto einer Stahlaufnahmescheibe mit 2 Dehnungsmessstreifen

Über einen Trägerfrequenzgenerator werden die 4 Signale der 4 Dehnungsmessstreifen-Vollbrücken verstärkt der Erfassung mittels SC-2345 Signal Conditioning Connector Block mit analogen Eingangsmodulen und PC-Steckkarte dem Rechner zugeführt, Abbildung 4.4.4-2.

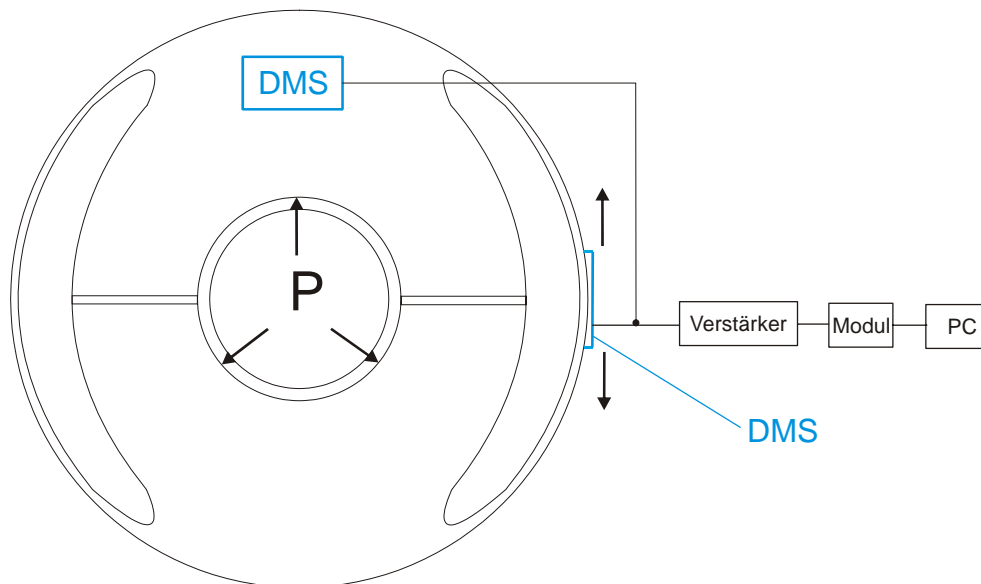


Abbildung 4.4.4-2: Schematische Darstellung der Aufnahmescheibe aus Stahl und Position der Dehnungsmessstreifen zur Druckmessung in der Leitung

Die Kräfte, die auf die Innenwand des Förderstreckenschlauchs wirken sind als Druck des Fördermediums in diesem Streckenteil interpretierbar. Vorteil dieser Druckmessung gegenüber der Verwendung von Druckmessdosen (DMU) ist die einfache Positionierbarkeit. Zudem ist kein Auftrennen der Förderleitung erforderlich. Allerdings ist diese Messmethode ungenauer.

Ohne Absperrblasenbetrieb und ohne Förderung wurden bei geschlossener Förderstrecke die DMS mit den DMU skaliert. Exemplarisch für alle 4 DMS zeigt Abbildung 4.4.4-3 die Skalierung des DMS1 als Zusammenhang zwischen den DMS1-Spannungsmesswerten in Volt und dem jeweils aktuellen Druck in der Anlage in bar.

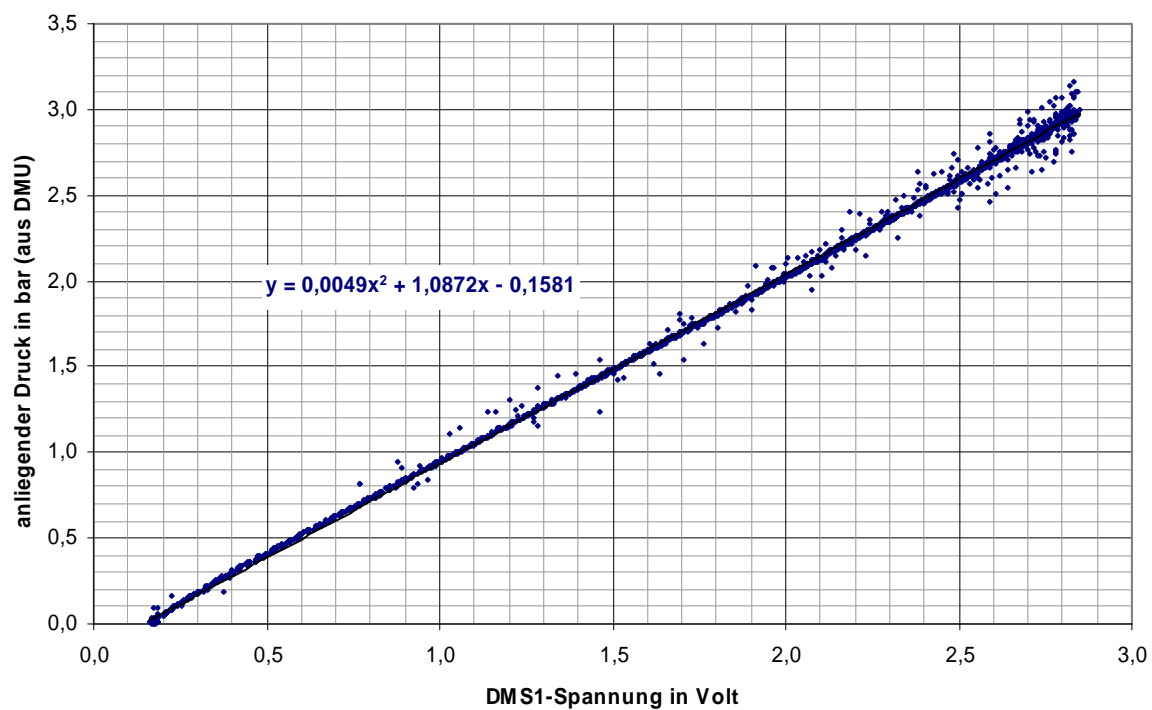


Abbildung 4.4.4-3: Skalierung des DMS1 in bar

4.4.5 Wägezelle

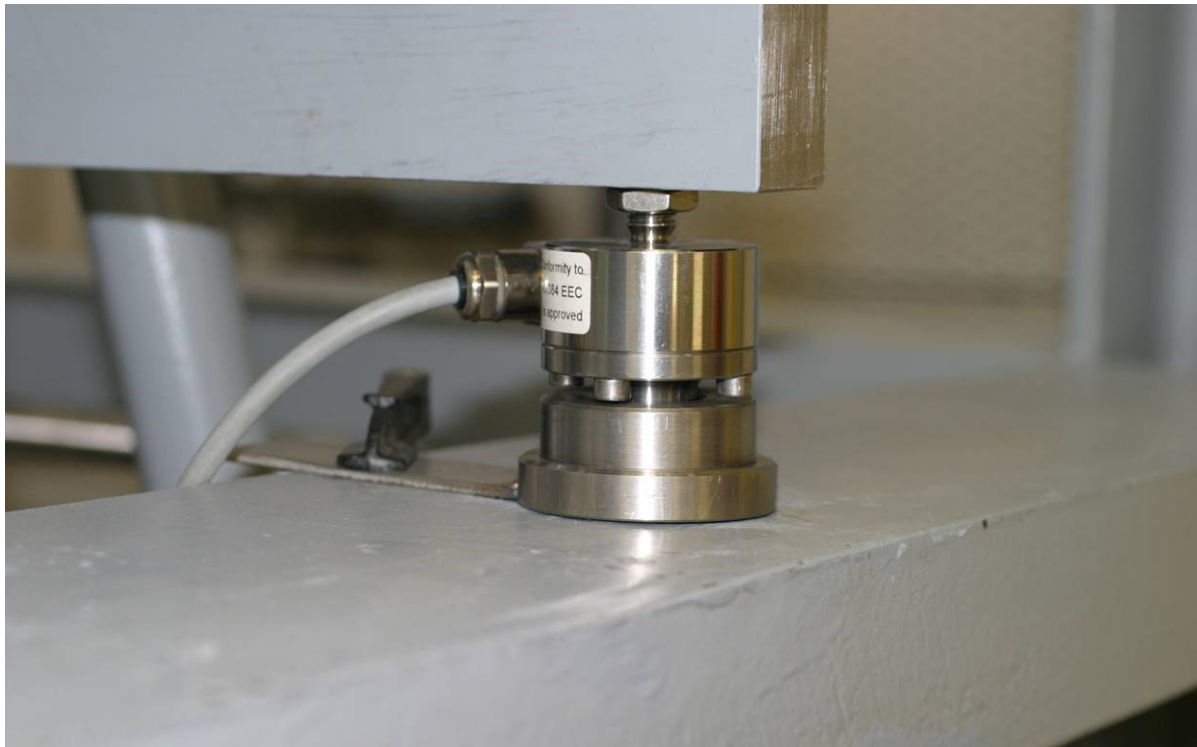


Abbildung 4.4.5-1: In Pilotanlage eingebaute Wägezelle

In der Pilotanlage befindet sich die Wägezelle, wie Abbildung 4.4.5-1 zeigt, seitlich unterhalb des Druckbehälters.

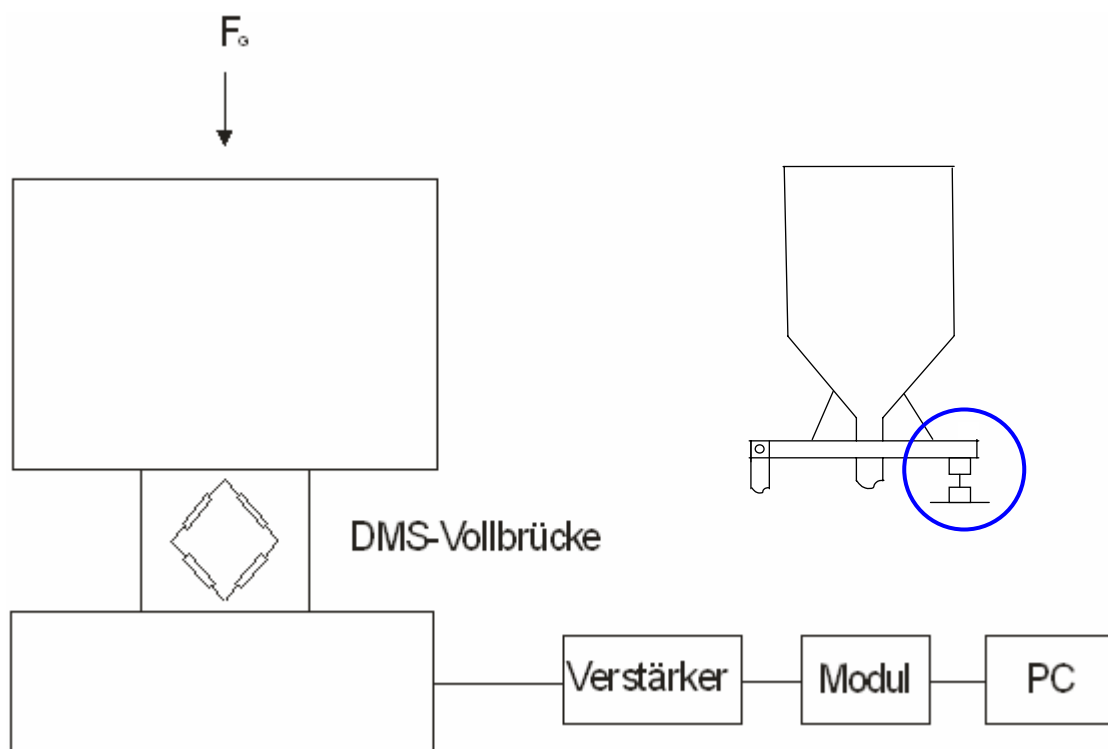


Abbildung 4.4.5-2: Funktionsweise der Wägezelle, schematischer Aufbau und Signalweg

Um mit der Wägezelle aussagefähige Werte hinsichtlich der zu- und abgeführten Mengen des Fördergutes zu erhalten, wurde der Druckbehälter vom Verbindungsrohr mittels eines Kompensators entkoppelt. Durch diesen aus Gummi bestehenden Balg werden Druck- und Zugkräfte, die durch den Befüllungs- und Entleerungsvorgang der Absperrblasen zwangsläufig auftreten und zu fehlerhaften Werten der Wägezelle führen, herabgesetzt.

Die Wägezelle (WZ) ist als eine Vollbrücke mit 4 Dehnungsmessstreifen ausgeführt, welche die Gewichtskraft messen. [Hot05] beschreibt die verwendete Wägezelle mit einer Nennlast von max. 100 kg. Ebenfalls über einen Trägerfrequenzgenerator wird das Signal der WZ verstärkt der Erfassung mittels SC-2345 Signal Conditioning Connector Block mit analogen Eingangsmodul und PC-Steckkarte dem Rechner zugeführt, Abbildung 4.4.5-2.

Über eine vorhergehende Wägung des in den Druckbehälter gefüllten Sandes mit einer kalibrierten Waage wurden unter Variation des Drucks im Druckbehälter die Skalierungsmessungen der Wägezelle durchgeführt. Die erfasste Wägezellenspannung wird mit den in Abbildung 4.4.5-3 dargestellten Skalierungsgleichungen in kg umgerechnet.

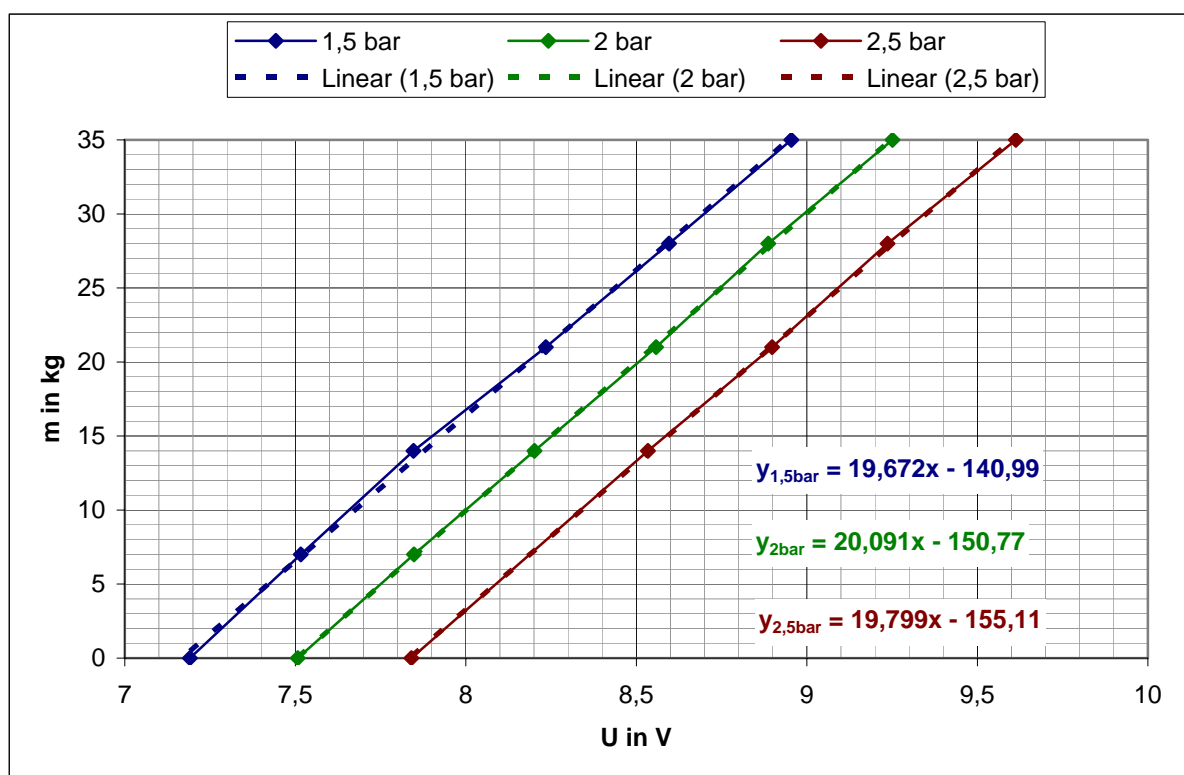


Abbildung 4.4.5-3: Skalierung der Wägezelle in kg

Es ist ein Druckeinfluss auf die Wägezellenmesswerte erkennbar, so dass bei steigendem Druck die Wägezellenmesswerte für dieselbe Fördergutmasse ebenfalls zunehmen. Die Ursache ist mit Gleichung (4.4.5.1) beschreibbar. Dieser Druckeinfluss ist damit erklärbar, dass sich der Kompensatorbalg nach unten abstößt, wenn der Druckbehälter mit Druck beaufschlagt ist.

$$F = F_G + p \cdot A \quad (4.4.5.1)$$

mit: F = gesamte von der WZ gemessene Kraft in $(\text{kg} \cdot \text{m})/\text{s}^2$

F_G = Gewichtskraft des Fördergutes in $(\text{kg} \cdot \text{m})/\text{s}^2$

p = Anlagendruck in bar

A = mit Druck beaufschlagte wirksame Fläche in m^2

4.4.6 Versuchsaufbau Verschleißmessungen

Für die Messungen zur Generierung des Förderzustandsdiagramms wurde der bisher beschriebene Versuchsaufbau zur pneumatischen Förderung verwendet.

Für die Durchführung von Verschleißmessungen wurde die Förderstrecke nach dem DMU1 jeweils um 1 bzw. 2 Kupferrohre gemäß der Abbildungen 4.4.6-1 oder 4.4.6-2 ergänzt.

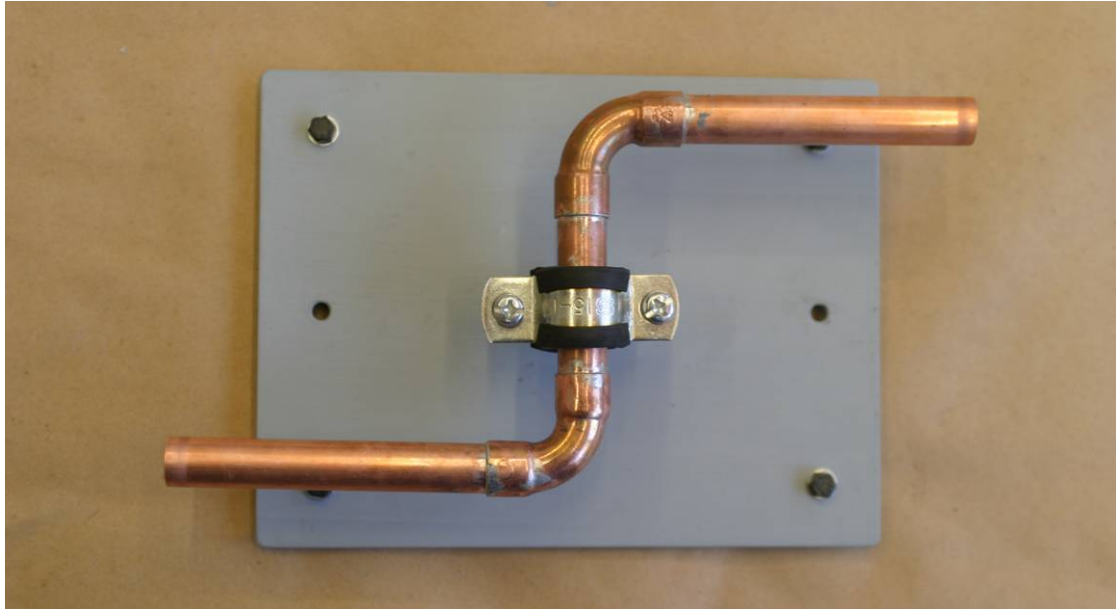


Abbildung 4.4.6-1: Kupferrohr mit 2 90°-Krümmern

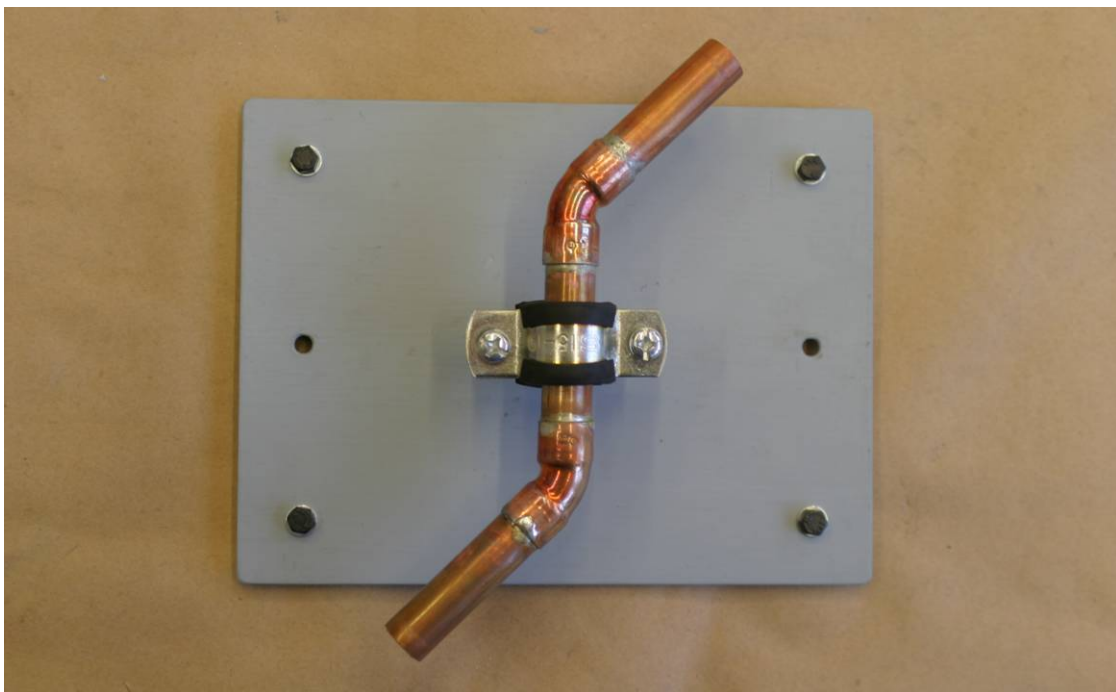


Abbildung 4.4.6-2: Kupferrohr mit 2 45°-Krümmern

Der Verschleiß der Kupferrohre wurde durch Gewichtsmessung der Kupferrohre und -segmente verbunden mit einer Querschnittsuntersuchung wie in Kapitel 6.4 beschrieben ermittelt.

5 Beschreibung des Fördergutes

Das in der Pilotanlage verwendete Fördergut Quarzsand als Modellsubstanz ist mittels Röntgendiffraktometermessungen und quantitativer chemischer Analyse, über seine physikalischen Eigenschaften und über Partikeleigenschaften mit Hilfe mikroskopischer Betrachtungen und Korngrößen- sowie Kornformanalyse eingehend untersucht worden. Hierdurch erfolgte die Beschreibung des Fördergutes im Anlieferungszustand sowie nach 200 h im pneumatischen Förderbetrieb, um z. B. die Änderung der Partikeleigenschaften darzustellen. Darüber hinaus stellen die Ergebnisse die für das mathematische Modell zur Strählen- und Pfropfenförderung und für die Betrachtung der Verschleißmessungen notwendigen Fördergutkenngrößen und -analysen zur Verfügung.

5.1 Zusammensetzung des Fördergutes

Mit dem Röntgendiffraktometer des Instituts für anorganische und analytische Chemie der TU-Clausthal sind der verwendete Sand, sowie der aus dem Abrieb entstandene Staub untersucht und miteinander verglichen worden.

5.1.1 Röntgendiffraktometermessungen

Bei der Röntgendiffraktometeruntersuchung nach [Wer08] handelt es sich um ein zerstörungsfreies Analyseverfahren, welches auf dem Prinzip der Röntgenbeugung basiert. Hiermit können die verschiedenen kristallinen Phasen der zu untersuchenden Substanz identifiziert werden. Es wird hierbei monochromatische Röntgenstrahlung auf die Probe geleitet. Die durch die Wechselwirkung mit der Probe gebeugte Strahlung wird dann detektiert und im vorliegenden Fall das Ergebnis in Form eines Pulverdiffraktogramms dargestellt. Die entstandenen Peaks werden miteinander verglichen und in Abhängigkeit der Intensität kann bei vorliegender qualitativer Analyse ebenfalls eine Quantifizierung durchgeführt werden. In Abbildung 5.1.1-1 ist das für die Messungen verwendete Pulverdiffraktometer dargestellt.



Abbildung 5.1.1-1: Verwendetes Röntgenpulverdiffraktometer

Die Ergebnisse der Röntgendiffraktometermessungen des 200 Stunden in der Pilotanlage pneumatisch geförderten Quarzsandes und des sich dabei gebildeten Staubes in den Abbildungen 5.1.1-2 und 5.1.1-3 zeigen das SiO_2 -Spektrum. Der jeweils größte Peak in den beiden Abbildungen bestätigt hierbei die quantitative chemische Analyse aus Tabelle 5.1.2-1 des Quarzwerkes Weferlingen [Qua03]. Die übrigen Peaks stellen Reflektionen des SiO_2 -Signals dar, die bei den Pulverdiffraktometermessungen auftreten. Somit beschreibt die sehr gute Übereinstimmung der beiden Diffraktogramme, dass die untersuchten Proben des Sandes und des Staubes in ihrem Hauptbestandteil SiO_2 qualitativ und quantitativ chemisch übereinstimmen.

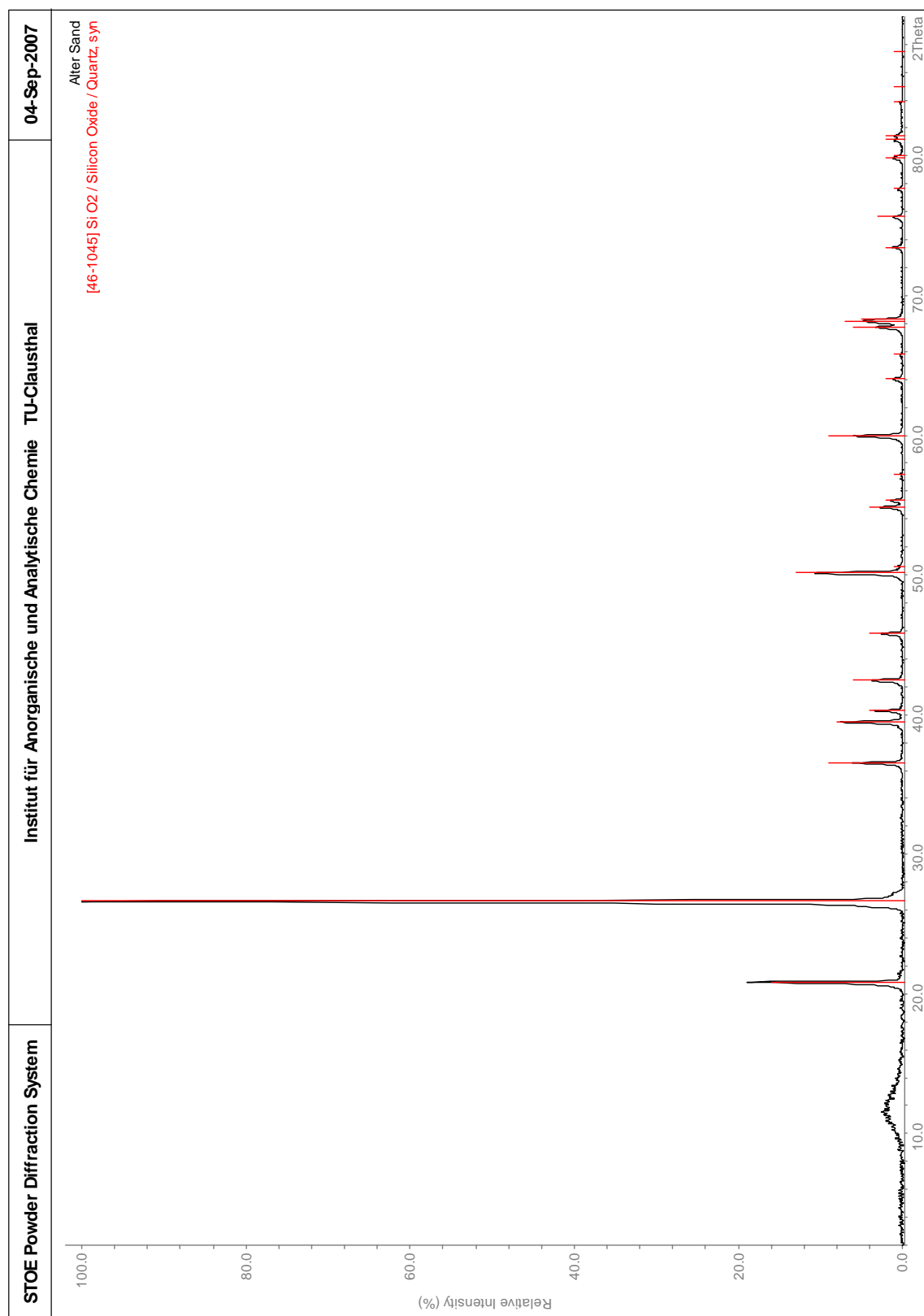


Abbildung 5.1.1-2: Charakteristische Röntgendiffraktometeraufnahme des SiO₂ am Beispiel des alten Sandes

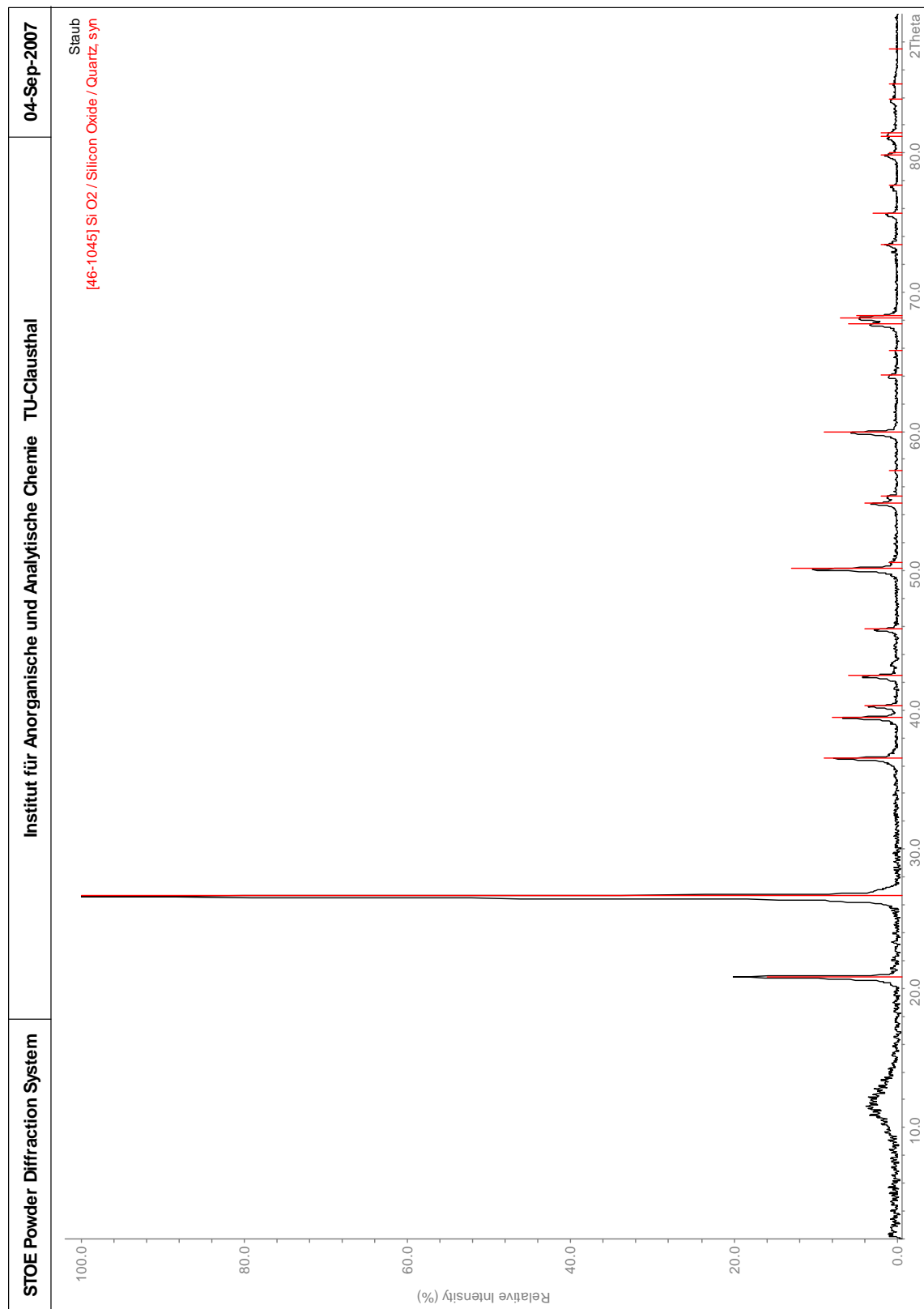


Abbildung 5.1.1-3: Charakteristische Röntgendiffraktometeraufnahme des SiO₂ am Beispiel des Staubes

5.1.2 Quantitative chemische Analyse

Die quantitative chemische Analyse des Fördergutes in Tabelle 5.1.2-1 zeigt die Hauptbestandteile des Quarzsandgemisches im Anlieferungszustand.

Typische chemische Analyse (Gew.-%)	
Quarzsand Weferlingen	WF32
SiO ₂	99,6
Al ₂ O ₃	0,1
Fe ₂ O ₃	0,03
Glühverlust 1000°C (DIN EN ISO 3262-7)	0,15

Tabelle 5.1.2-1: Beschreibung des neuen Sandes gemäß technischen Datenblatts des Quarzwerkes Weferlingen [Qua03]

Im Folgenden wird der Quarzsand im Anlieferungszustand als „Neuer Sand“ bezeichnet. Quarzsand, der ca. 200 h in der Pilotanlage gefördert wurde, bekommt die Bezeichnung „Alter Sand“. Abrieb, der ebenfalls während der 200-stündigen pneumatischen Quarzsandförderung in der Pilotanlage entstand, wird auch Staub genannt. In Tabelle 5.1.2-2 sind die Ergebnisse der quantitativen chemischen Analysen von „Neuer Sand“, „Alter Sand“ und „Staub“ einander gegenübergestellt. Bei diesen quantitativen chemischen Analysen wurden die Proben gezielt auf Elemente untersucht, die vom Materialabrieb des Fördersystems während der pneumatischen Förderung stammen.

	C ges. Mass.-%	Cr Mass.-%	Cu Mass.-%	Fe Mass.-%	Ni Mass.-%	S Mass.-%
Neuer Sand	0,01	< 0,001	< 0,001	0,01	< 0,001	< 0,010
Alter Sand	0,13	0,001	0,048	0,03	0,001	< 0,010
Staub	0,22	0,001	0,082	0,04	0,001	< 0,010

Tabelle 5.1.2-2: Ergebnisse der quantitativen chemischen Analyse zum Vergleich von neuem Sand, altem Sand und Staub

Bei den Analysen fiel auf, dass die Verteilung von Fe und Cu relativ inhomogen ist.

Zu erkennen ist, dass sich nach 200 h Förderung mehr Kohlenstoff, Kupfer und Eisen in den Proben „Alter Sand“ und „Staub“ befinden. Der Kohlenstoff stammt dabei aus dem Förderleitungsmaterial Polyvinylchlorid. Die in „Alter Sand“ und „Staub“ festgestellten Kupfergehalte lieferten die verwendeten Kupferwinkel während der Versuchsreihen zur Verschleißmessung. Die Fe-Gehalte rühren zum überwiegenden Teil vom Metallabrieb des Verbindungsrohres zwischen Vorrats- und Druckbehälter während des Betriebs der Absperrblasen. Durch die sich in Betrieb befindlichen Absperrblasen findet ein sehr hoher abrasiver Vorgang im Verbindungsrohr zwischen Absperrblase, Sand und Verbindungsrohr statt. Es ist offensichtlich, dass es sich dabei meist um sehr feinen Abrieb handelt, da die Zunahmen der Massenprozent dieser Elemente in der feineren Staub-Probe wesentlich größer sind als in der Probe „Alter Sand“. Die auffällig inhomogene Verteilung von Eisen und Kupfer in den Analysen weist ebenso auf Abrieb hin.

5.2 Physikalische Eigenschaften des Fördergutes

Zur Korrektur des für die Förderung relevanten Gasvolumenstroms am Anfang der Förderstrecke ist der aus dem Druckbehälter geförderte Quarzsand betrachtet worden. Das Volumen der geförderten Quarzsandmasse wurde mit ihrer Dichte aus Tabelle 5.2-1 berechnet und durch das gleiche Volumen des in den Fluidisierer strömenden Fördergases bei bekanntem Druck ersetzt, so dass der Druck im Fluidisierer gleich blieb. Tabelle 5.2-1 zeigt die physikalischen Kenndaten des Fördergutes Quarzsand. Die Dichte des in der Förderleitung fließenden Quarzsandes ist als Fördergutdichte in das mathematische Modell zur pneumatischen Strähnen- und Pfropfenförderung eingegangen. Demgegenüber ist im Schüttgewicht der luftgefüllte Porenraum mit eingerechnet.

Typische physikalische Eigenschaften	
Linearer Ausdehnungskoeffizient α 20° - 300° C α 20° - 600° C	 14*10 ⁻⁶ K ⁻¹ 24*10 ⁻⁶ K ⁻¹
Sinterbeginn	1.575° C
Umwandlungstemperatur (β Quarz \leftrightarrow α Quarz)	573° C
Schüttwinkel für trockenen Quarzsand	$\alpha = 33^\circ$
Schüttgewicht (t/m³)	1,4
Dichte (DIN ISO 787-10)	2,65 g/ml
Härte nach Mohs	7

Tabelle 5.2-1: Physikalische Stoffdaten des neuen Sandes gemäß technischen Datenblatts des Quarzwerkes Weferlingen [Qua03]

5.3 Partikeleigenschaften des Fördergutes

5.3.1 Mikroskopische Betrachtungen

Die Beschreibung der Partikeleigenschaften des Quarzsandes erfolgt zunächst über die Betrachtung der mikroskopischen Aufnahmen des Sandes in den Abbildungen 5.3.1-1, 5.3.1-2 und 5.3.1-3. Das Mikroskop-Bild 5.3.1-1 zeigt die unterschiedlichen Korngrößen und -formen des verwendeten Quarzsandes.

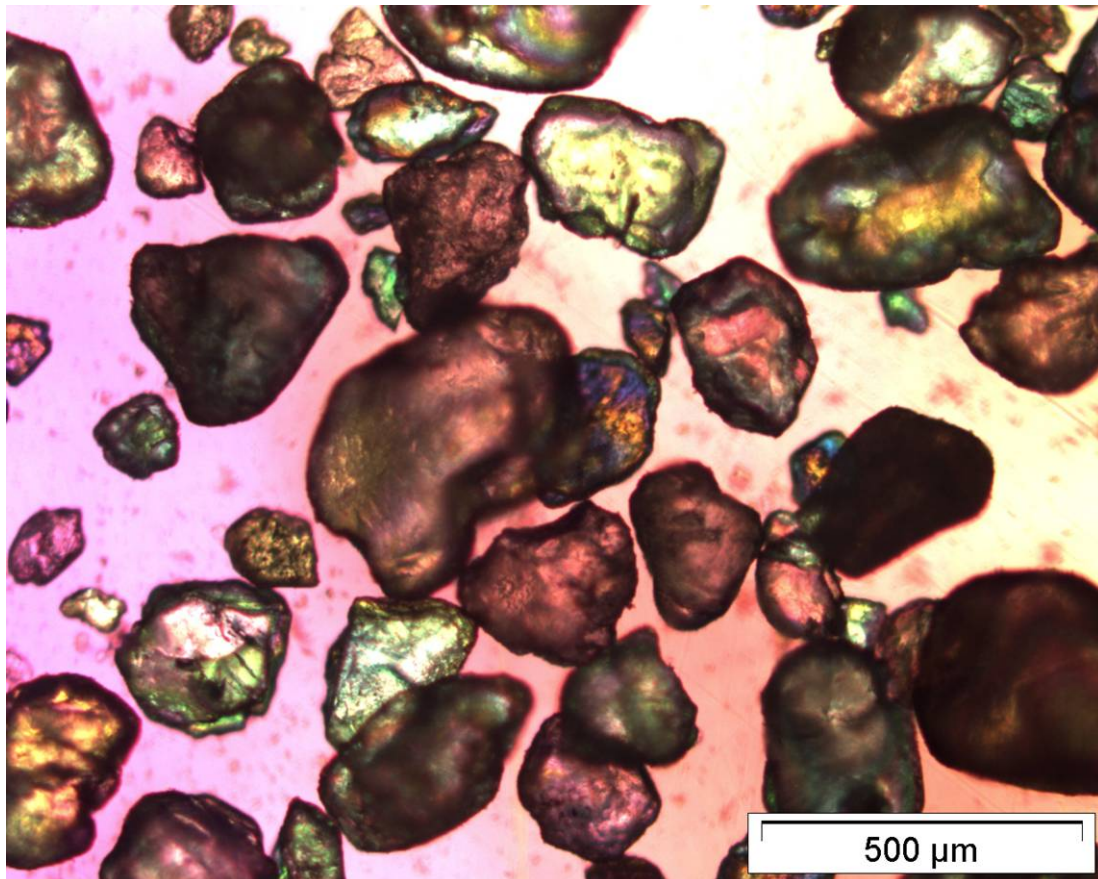


Abbildung 5.3.1-1: Mikroskopische Aufnahme des Sandes

Im Folgenden werden die Partikeleigenschaften des neuen und alten Sandes mittels der mikroskopischen Aufnahmen in den Abbildungen 5.3.1-2 und 5.3.1-3 miteinander verglichen. Die Abbildung 5.3.1-2 zeigt die rauheren Oberflächenstrukturen des neuen Sandes. Die Partikel des 200 h geförderten alten Quarzsandes besitzen aufgrund des, während der pneumatischen Förderung stattfindenden Verschleißes, glatt geschliffene Oberflächen [Sal02]. Diese sind in Abbildung 5.3.1-3 als glänzende Stellen sichtbar. Aufgrund der hohen Abrasionswirkung entstandener Staub haftet den Oberflächen der einzelnen Sandkörner in Abbildung 5.3.1-3 an.

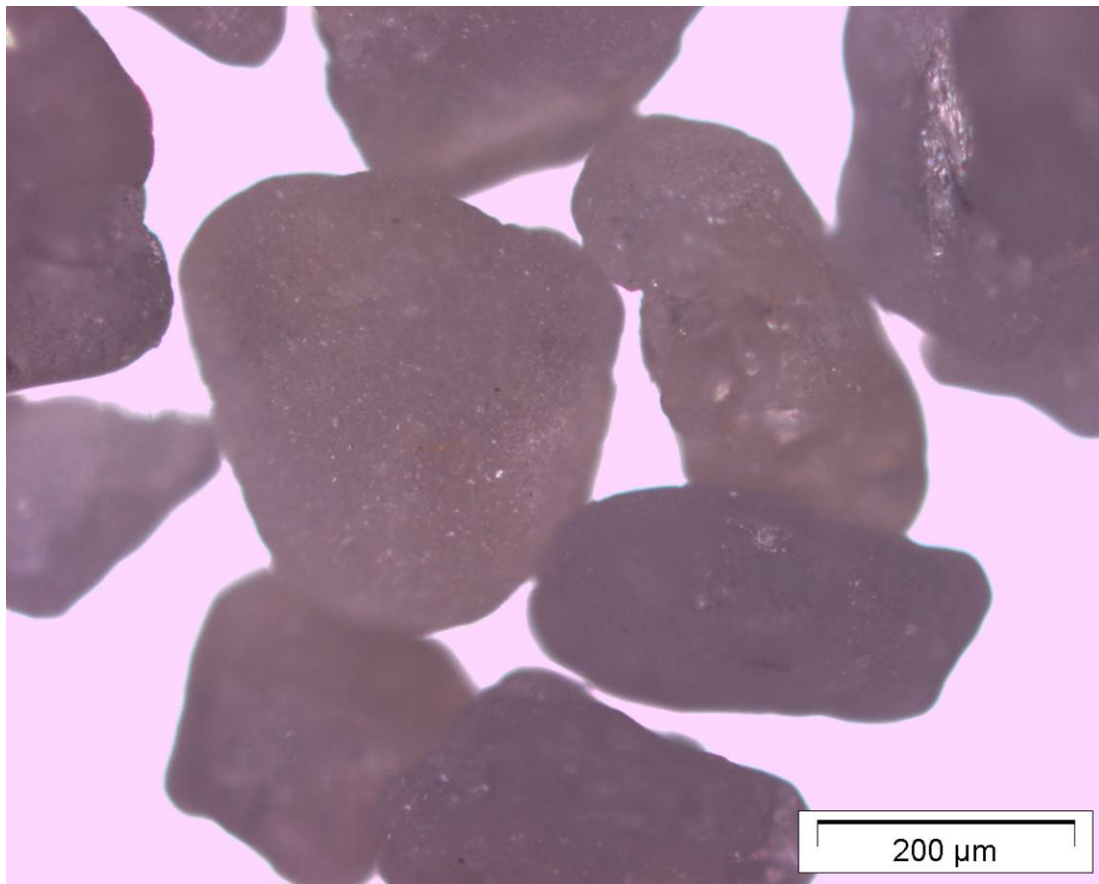


Abbildung 5.3.1-2: Mikroskopische Aufnahme des neuen Sandes

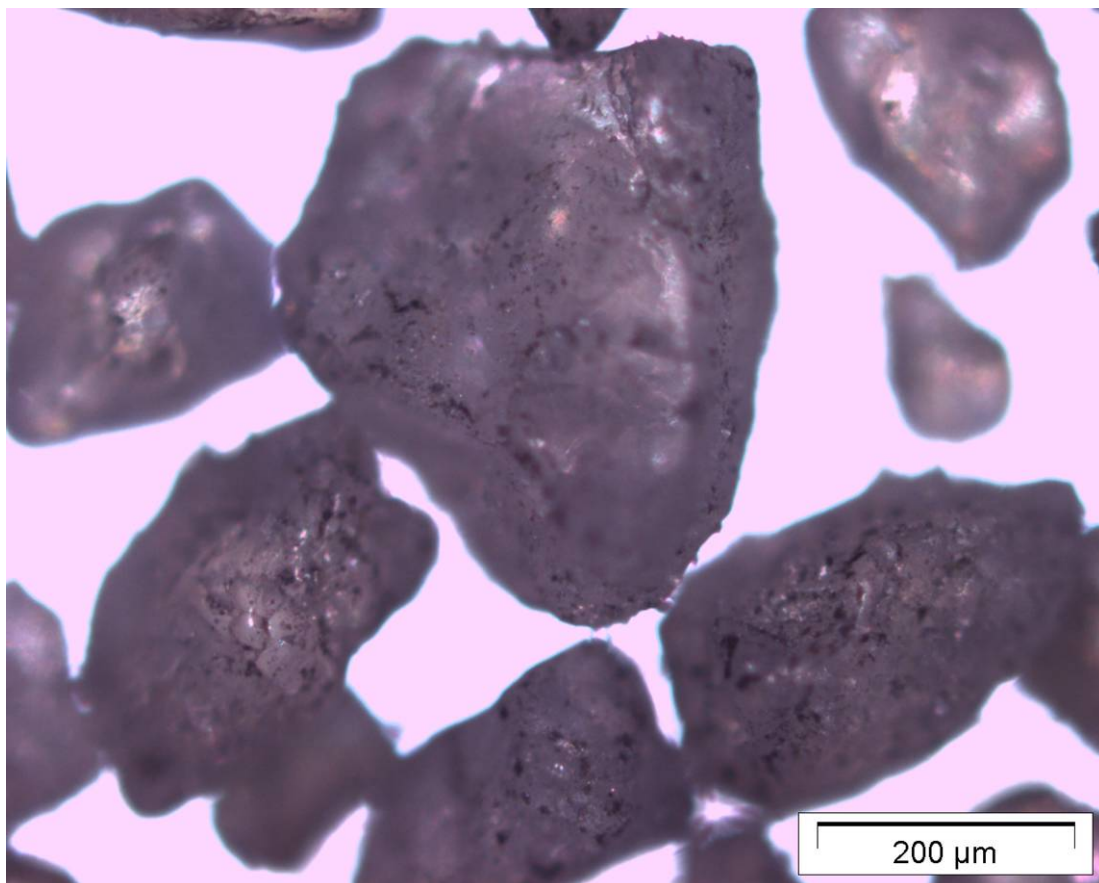


Abbildung 5.3.1-3: Mikroskopische Aufnahme des alten Sandes

Abbildung 5.3.1-4 stellt den Staub auf den Partikeln aus Abbildung 5.3.1-3 separat dar. Der Abrieb stellt sich im Gegensatz zu den Quarzsandkörnern deutlich kleiner dar und liegt form- und regellos vor.

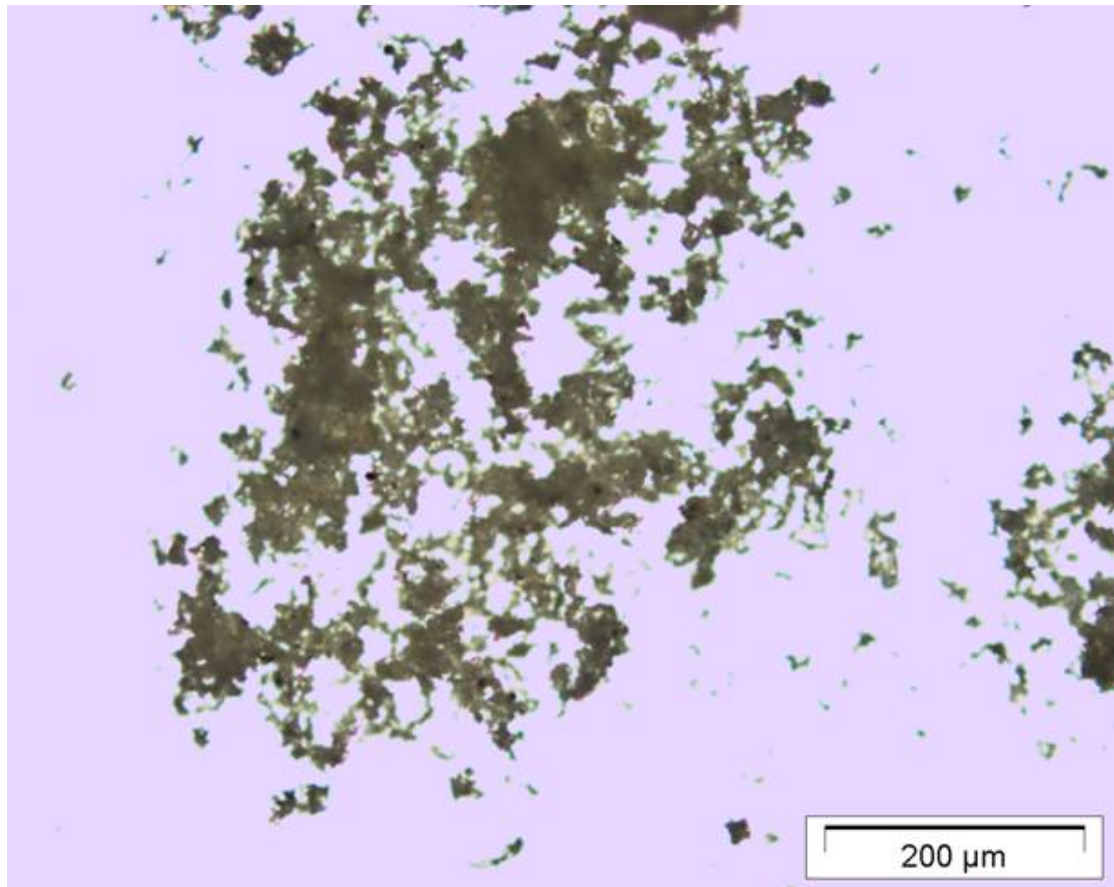


Abbildung 5.3.1-4: Mikroskopische Aufnahme des Abriebs bei 100-facher Vergrößerung

5.3.2 Korngrößen- und Kornformanalyse mittels Laserdiffraktometer

Für den in dieser Arbeit verwendeten grobdispersen Quarzsand als Modellsubstanz wurde die Sphärizität mittels eines bildverarbeitenden Korngrößenanalysegerätes bei der Firma Sympatec ermittelt. Hierbei wurden Sandproben des Fördergutes aus den Versuchen eingesetzt, die in Summe 200 Stunden durch die Versuchsanlage transportiert worden waren. Demgegenüber wurden Proben mit neuem, unbenutztem Sand verwendet und miteinander verglichen.

Bei dem Bildanalyseverfahren QICPIC handelt es sich um ein von der Firma Sympatec entwickeltes Laserdiffraktometer, welches Partikelgrößen- und Formanalyse miteinander kombiniert und auch für agglomerierte feine und kohäsive Pulver geeignet ist und die Sicherheitsanforderungen der FDA (Food and Drugs Administration) erfüllt sowie 21 CFR (Code of Federal Regulations) Rule 11 entspricht. Bei diesem Verfahren können Partikelgrößen zwischen 1 µm und 20 mm detektiert werden.

Die in den folgenden Abbildungen zur Beschreibung der Partikelgröße verwendete particle size ist der Durchmesser des zur Projektionsfläche des betrachteten Partikels flächenäquivalenten Kreises, bei der volumenbezogene Verteilungen betrachtet werden. Um hierbei einen Fehler von unter 1 % in der Standardabweichung zu erreichen, werden ca. 1.000.000 Partikel benötigt.

Die Partikelgrößenverteilungen in den Abbildungen 5.3.2-1, 5.3.2-2, 5.3.2-3 und 5.3.2-4 zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Stoffdatenblatt der Quarzwerke Weferlingen [Qua03]. Aus Abbildung 5.3.2-1 ist die Reproduzierbarkeit der Partikelgrößenmessung des neuen Sandes ersichtlich.

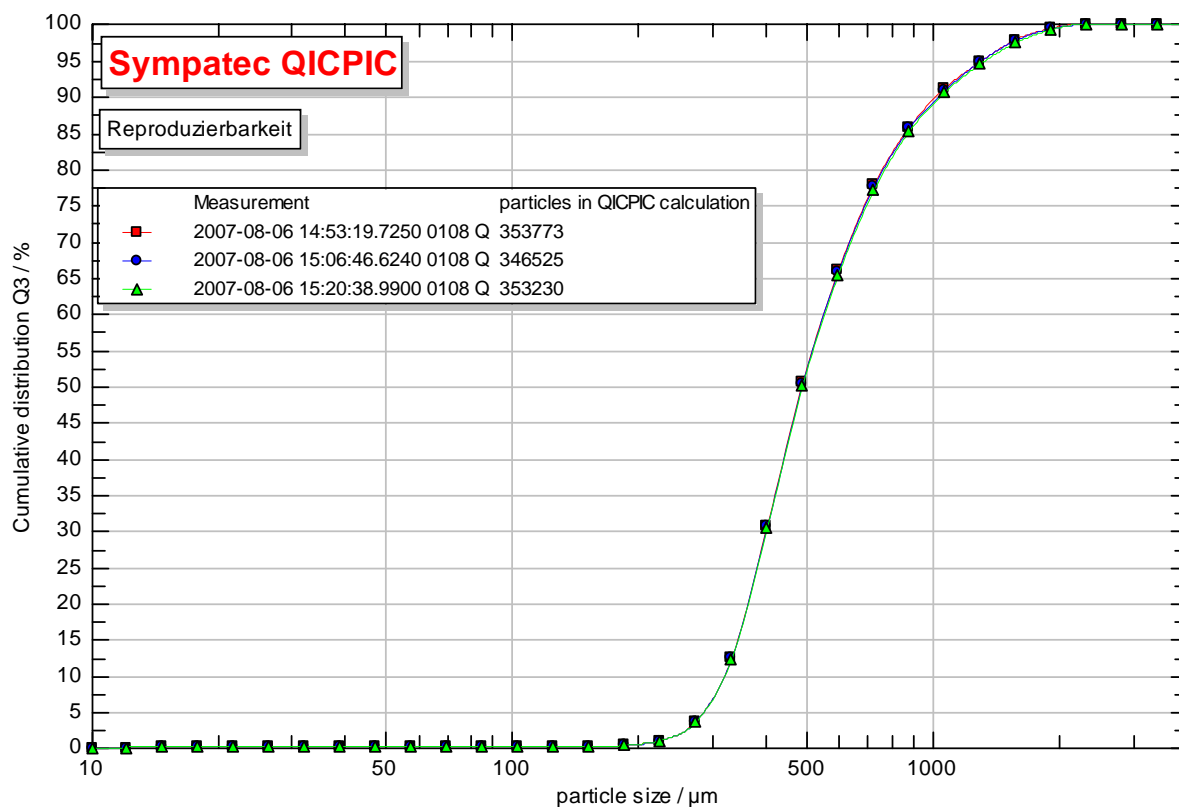


Abbildung 5.3.2-1: Reproduzierbarkeit der Summenkurve – neuer Sand

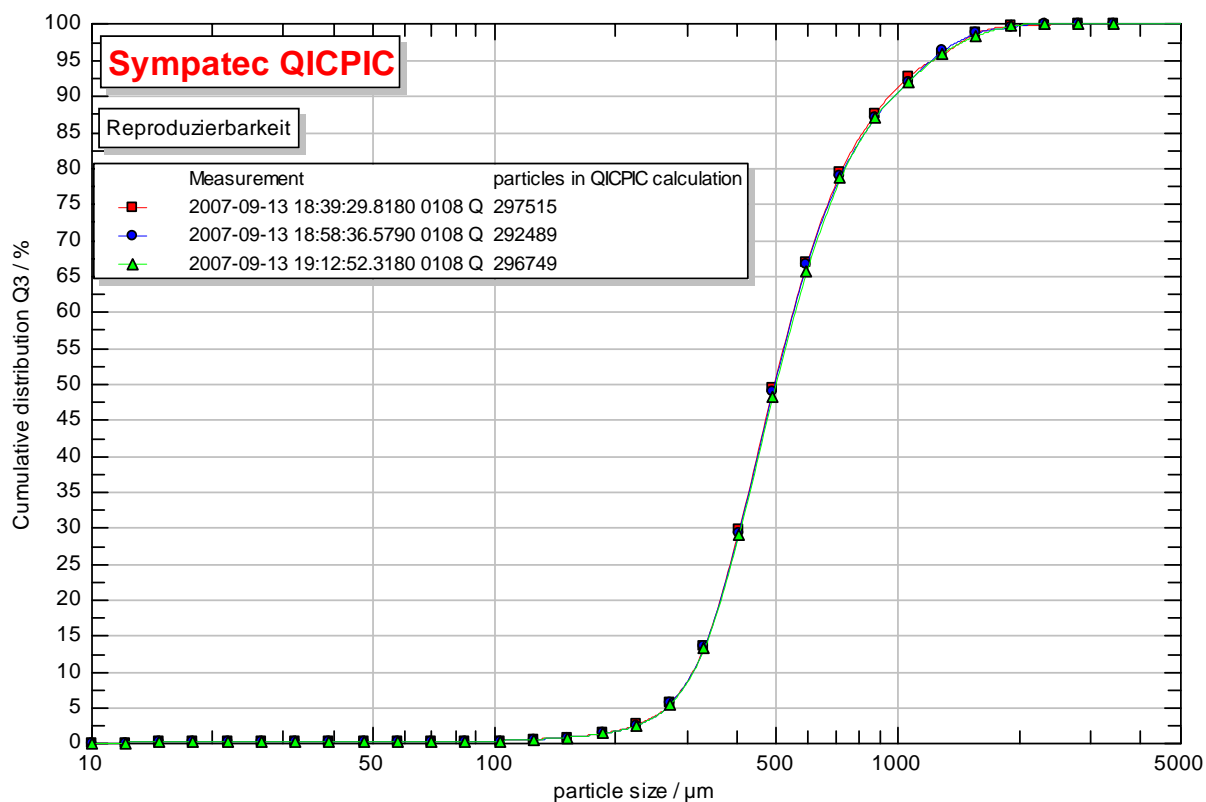


Abbildung 5.3.2-2: Reproduzierbarkeit der Summenkurve – alter Sand

Abbildung 5.3.2-2 verdeutlicht ebenfalls die Reproduzierbarkeit der Partikelgrößenmessung, allerdings für den 200 Stunden geförderten Sand. Die Streuung der Ergebnisse der 3 Proben ist in den Abbildungen 5.3.2-1 und 5.3.2-2 ähnlich gering, wodurch die vergleichende Darstellung in Abbildung 5.3.2-3 an Aussagekraft gewinnt.

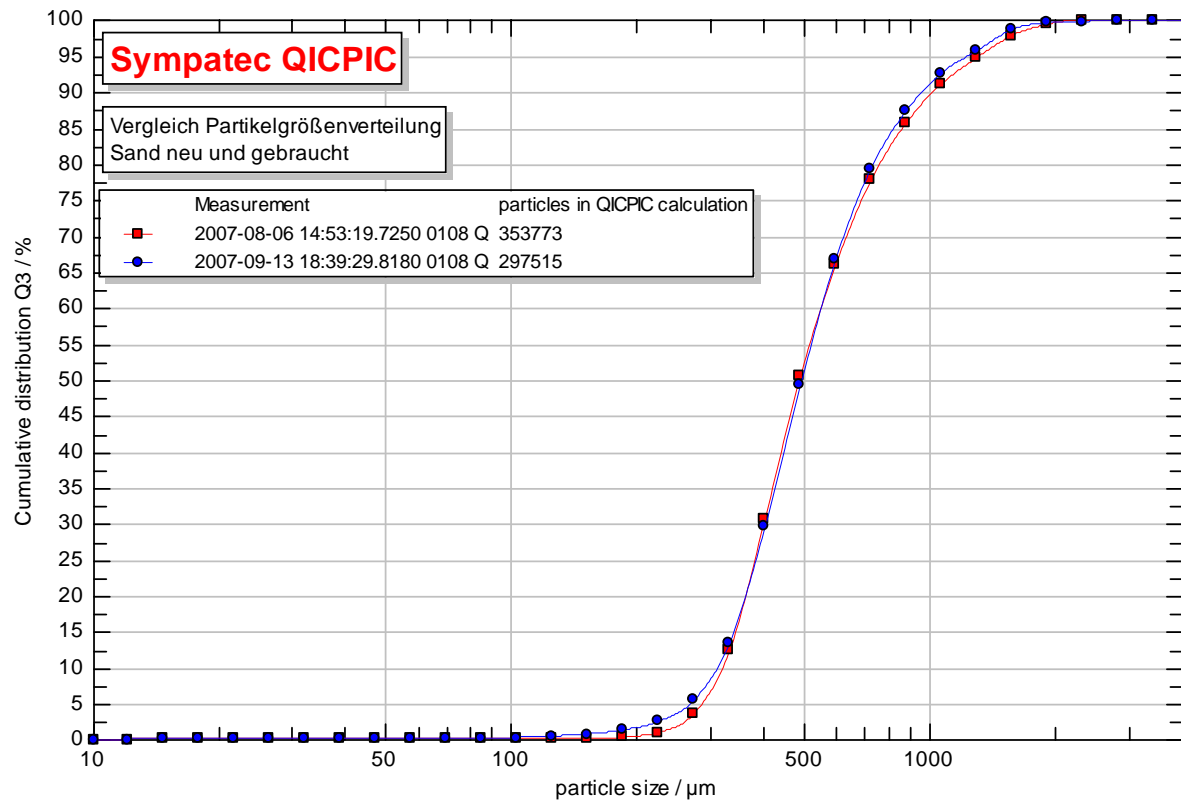


Abbildung 5.3.2-3: Vergleich der Summenkurven *alter/neuer* Sand

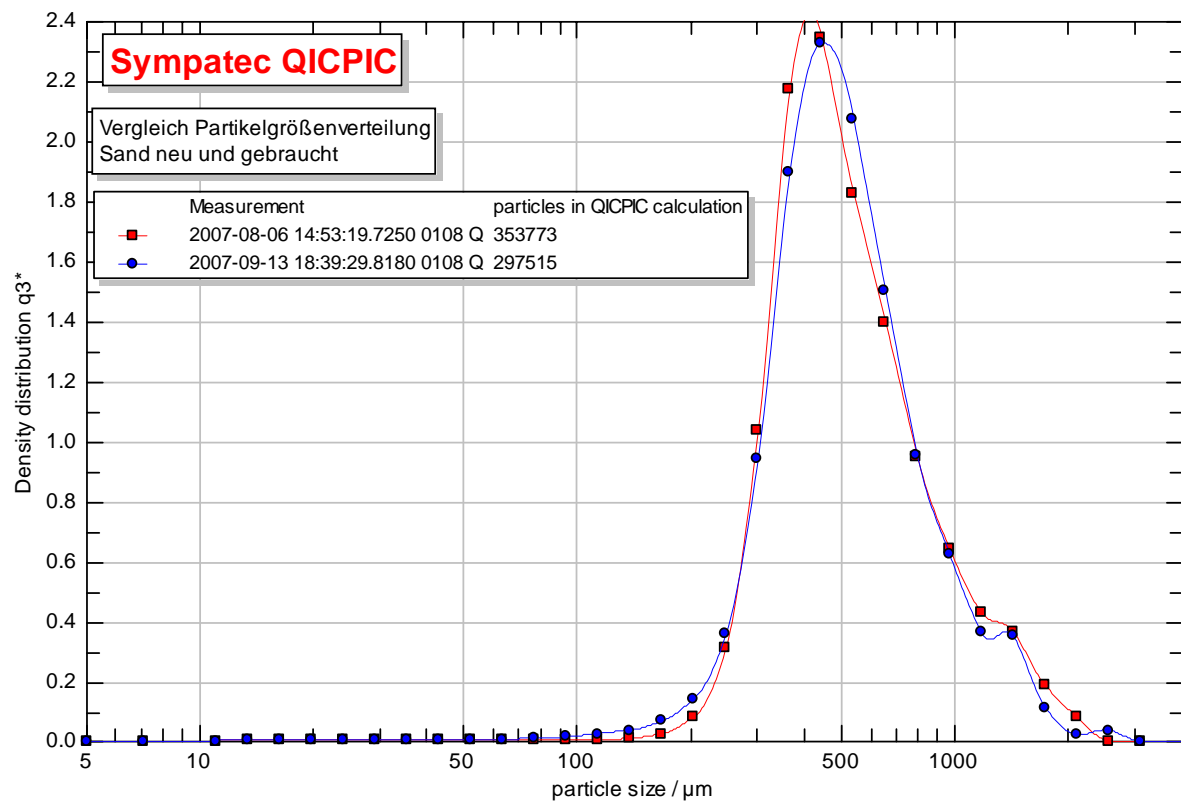


Abbildung 5.3.2-4: Vergleich der Dichtekurven *alter/neuer* Sand

Die Abbildungen 5.3.2-3 und 5.3.2-4 stellen Verläufe der Summenkurven bzw. der Dichtekurven für neuen und alten Sand einander gegenüber. Der Anteil sehr kleiner Partikel ist, nach dem Fördern über einen längeren Zeitraum, erhöht. Bei der Betrachtung sehr großer Partikel ist nach längerer pneumatischer Förderung eine Verringerung ihres Anteils ersichtlich, wodurch sich auch die Anzahl an Partikel mittlerer Größe von ca. 410 bis 700 μm erhöht.

Die Analysedaten dreier Proben des neuen Sandes sind zur Ermittlung der Kenngrößen zur Beschreibung des Partikeldurchmessers bei der Firma Sympatec in Clausthal-Zellerfeld darüber hinaus einer statistischen Auswertung unterzogen worden. Hierbei wurde ein mittlerer Partikeldurchmesser d_{50} von 389,93 μm \pm 0,91 μm für den neuen Sand ermittelt, Anhang A Versuchsergebnisse zur statistischen Auswertung der Korngrößenanalyse. Die in Abbildung 5.3.2-4 dargestellte Dichtekurve des neuen Sandes zeigt die Ergebnisse einer dieser drei Proben. Durch den Förderprozess ist zu erwarten, dass der Partikeldurchmesser d_{50} im Laufe der Zeit geringfügig abnimmt. In Unterkapitel 2.2 erwähnte bereits [VDI02], dass ab Beladungen von $\mu = 2$ der Druckverlust bei der pneumatischen Förderung polydispersem Fördergutes, wie im vorliegenden Fall, mit d_{50} beschreibbar ist. Für die Berechnung des Druckverlustes gemäß dem mathematischen Modell zur Strähnen- und Pfropfenförderung findet der ermittelte Kennwert d_{50} im Weiteren Verwendung.

Abschließend wird zur Kornformanalyse in den Abbildungen 5.3.2-5, 5.3.2-6 und 5.3.2-7 die aus Kapitel 2.2 bekannte Kornformkennzahl Sphärizität in Bezug zum Partikeldurchmesser betrachtet. Gleichung (2.2.1) beschreibt die Sphärizität als das Verhältnis der Oberfläche einer Kugel mit gleichem Volumen zur Oberfläche des Partikels. Im Vergleich mit den Angaben von [Leh06] in Tabelle 2.2-1 wird hier dementsprechend der Kehrwert der dort beschriebenen Heywoodfaktoren betrachtet. Für die Kornformanalyse und somit für die Sphärizität gilt ähnlich zur Korngrößenanalyse, dass ca. 1.000.000 Partikel zum Erreichen eines Fehlers in der Standardabweichung von unter 1 % benötigt werden [Sym07].

Im Bereich von Partikelgrößen bis 1200 μm zeigen die Sphärizitätsverläufe des neuen Sandes in Abbildung 5.3.2-5 eine maximale Streuung der Sphärizitätswerte von $\pm 0,01$. Im selben Partikelgrößenbereich weisen die Sphärizitätsverläufe des alten Sandes in Abbildung 5.3.2-6 eine maximale Streuung der Sphärizitätswerte von $\pm 0,005$ auf, so dass der über 200 h geförderte alte Sand für vergleichbare Partikelgrößen meist eine geringere Streuung der Sphärizität des untersuchten Probenmaterials besitzt als der neue Sand. Allerdings liegen die ablesbaren Sphärizitätsstreuungen für neuen Sand nur teilweise und dann auch nur knapp über der Messgenauigkeit der Sphärizität von 1 %. Dass alter Sand das homogenere Gemenge wäre ist auf Basis dieser Messergebnisse somit nicht sicher schlussfolgerbar.

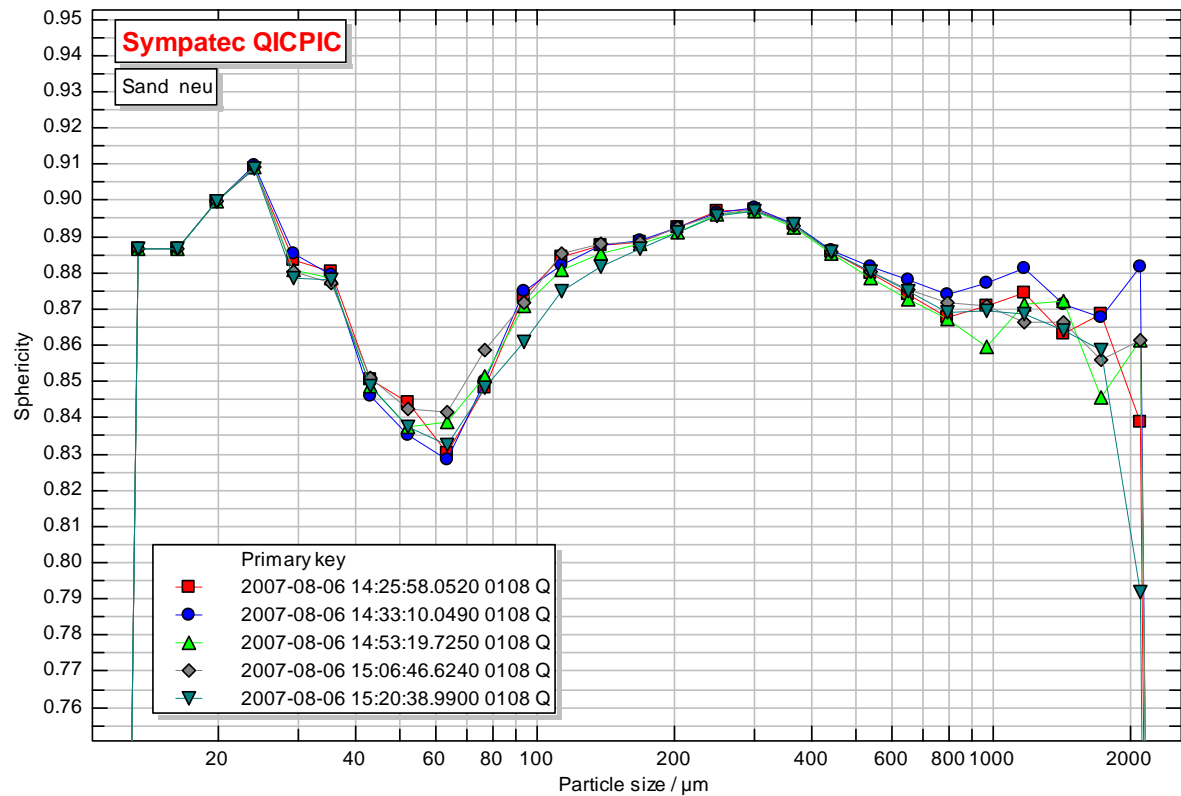


Abbildung 5.3.2-5: Sphärizität des neuen Sandes

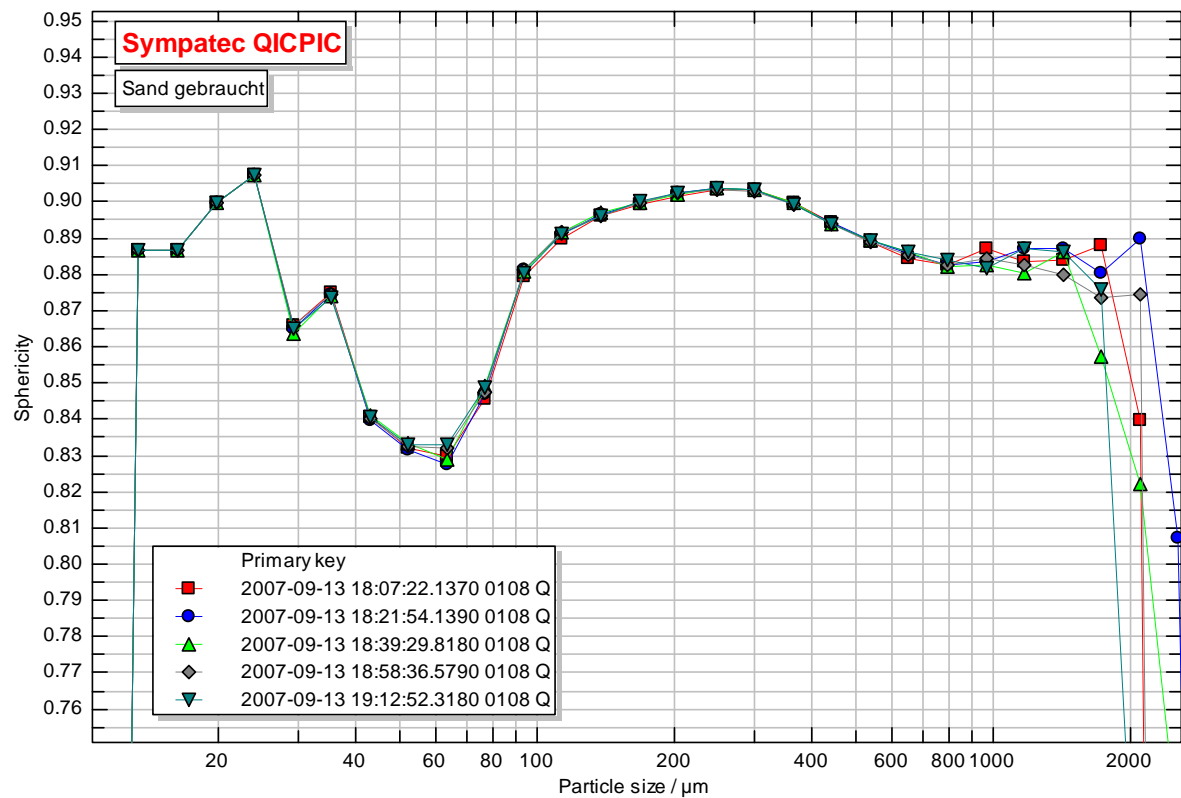


Abbildung 5.3.2-6: Sphärizität des alten Sandes

Beim weiteren Vergleich des neuen und alten Sandes in Abbildung 5.3.2-7 fällt zunächst auf, dass mittelgroße bis große Partikel von 80 bis über 1000 μm des alten Sandes runder sind als die entsprechenden Partikel des neuen Sandes. Weiterhin weist der alte Sand auf den ersten Blick bei Partikeln von 80 bis 30 μm eine geringere Sphärizität im Gegensatz zum neuen Sand auf. Aufgrund der Tatsache, dass die hierfür betrachteten Sphärizitätsunterschiede überwiegend innerhalb der Messgenauigkeit der Sphärizität liegen, sind jedoch diese beiden Aussagen nicht signifikant. Somit kann auch nicht sicher gefolgert werden, dass durch vermehrten Abrieb während der pneumatischen Förderung über einen längeren Zeitraum kleine Partikel entstehen, die noch weniger kugelförmig sind als die Partikel desselben Partikeldurchmessers im noch nicht geförderten neuen Sand.

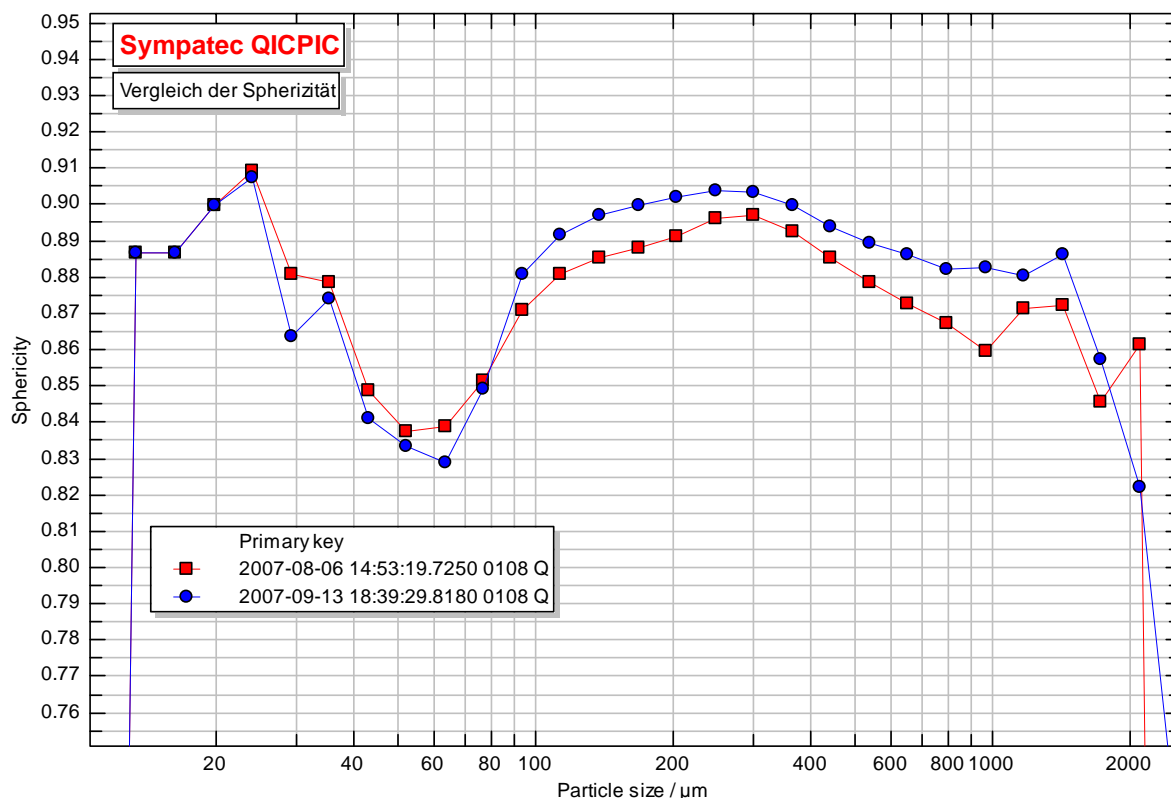


Abbildung 5.3.2-7: Vergleich der Sphärizität *alter/neuer* Sand

Vielmehr zeigt Abbildung 5.3.2-7 Sphärizitätsverläufe für den über 200 h geförderten alten Sand und den neuen Sand, die als identisch anzusehen sind.

5.4 Übersicht der Fördergutdaten und -befunde

Die relevanten Fördergutdaten und -befunde des Quarzsandes als Modellsubstanz werden in Tabelle 5.4-1 zusammengefasst.

		Neuer Sand	Alter Sand	Staub
Chemische Zusammensetzung	Mass.-% SiO ₂	99,6		
	Mass.-% C _{ges}	0,01	0,13	0,22
	Mass.-% Cr	< 0,001	0,001	0,001
	Mass.-% Cu	< 0,001	0,048	0,082
	Mass.-% Fe	0,01	0,03	0,04
	Mass.-% Ni	< 0,001	0,001	0,001
	Mass.-% S	< 0,010	< 0,010	< 0,010
Physikalische Eigenschaften	Schüttgewicht in t/m^3	1,4		
	Dichte in g/ml nach (DIN ISO 787-10)	2,65		
Partikeleigenschaften	Binokulare Mikroskop-aufnahmen	rauhere Oberflächenstrukturen	glatt geschliffene Oberflächen	regellos a. d. Oberflächen anhaftend
	Partikeldurchmesser in μm	> 10 und < 2310	> 10 und < 3000	<= 10
	d_{50} in μm	389,9 ± 0,9		
	Sphärizität	0,893 ± 0,009	0,900 ± 0,009	

Tabelle 5.4-1: Übersicht der relevanten Daten und Befunde zum Fördergut Quarzsand

Die chemische Zusammensetzung des Fördergutes zeigt die Reinheit des Quarzsandes im Anlieferungszustand, Neuer Sand, sowie die Anreicherung von Kohlenstoff und Metallen im über 200 h geförderten Quarzsand, Alter Sand, und dem durch Fördergutverschleiß entstandenen Staub. Diese Massenprozentanteile an Kohlenstoff und Metallen stammen aus dem Verschleiß der PVC-Förderleitung, den Stahlbehältern der Pilotanlage sowie den Cu-Krümmern, die für die Verschleißversuche eingesetzt waren. Hierbei weist der, sich während der 200 h Förderbetrieb, gebildete Staub im Vergleich mit dem ebenfalls über 200 h geförderten Quarzsand fast doppelt so hohe Massenprozentanteile für Kohlenstoff wie auch für Kupfer auf. Dies ist auf die abrasive Eigenschaft des amorphen Quarzsandes während der pneumatischen Förderung zurückzuführen.

Zur Durchführung der Korrektur des für die Förderung relevanten aktuellen Gasvolumenstroms zu Beginn der Förderstrecke wurde die Dichte des Quarzsandes im Anlieferungszustand verwendet. In das mathematische Modell zur Strähnen- und Pfropfenförderung aus Kapitel 3 ist diese Dichte des Quarzsandes im Anlieferungszustand als Fördergutdichte für den in der Förderleitung fließenden Quarzsand eingegangen. Ebenfalls diente der Kennwert des mittleren Partikeldurchmessers des polydispersen Fördergutes im Anlieferungszustand d_{50} zur Berechnung des Druckverlustes in diesem Modell.

6 Versuchsdurchführung

Werden die Aussagen der vorangegangenen Kapitel zusammengefasst, ergibt sich Folgendes:

Im Rahmen dieser Arbeit ist die in Kapitel 4 detailliert beschriebene Pilotanlage zur pneumatischen Förderung aufgebaut und mit Quarzsand als Modellschubmittel und Luft als Fördermedium betrieben worden. Als Förderleitung wurde PVC-Schlauch in der Pilotanlage eingesetzt, was die visuelle Betrachtung des Förderzustands über den gesamten Förderstreckenverlauf ermöglichte. Bezüglich ihres Aufbaus und Förderleitungsverlaufs ist die Pilotanlage der in Betrieb befindlichen Anlage am Hochofen der Dillinger Hütte nachempfunden. Somit weist sie sowohl horizontale als auch vertikal-steigende und vertikal-fallende Streckenabschnitte auf. Innerhalb dieser Förderleitungsabschnitte bilden sich aufgrund der, bezogen auf die Förderrichtung unterschiedlich gerichteten Gewichtskraft, unterschiedliche Förderzustände aus. Zur Beschreibung dieser realen pneumatischen Förderung ist eine Anpassung charakteristischer Größen erfolgt. Die Ausbildung eines einheitlichen Förderzustands ist in der Praxis auf vergleichbar ausgerichtete Streckenabschnitte begrenzt. Zur Darstellung in einem Förderzustandsdiagramm wurde ein charakteristischer Förderzustand für die Gesamtanlage benötigt und am Bildschirm visuell bestimmt. Im mathematischen Modell wurde die gesamte Förderleitungslänge der Pilotanlage mit $20m$ als Bezugslänge verwendet. An dieser Anlage sind auf diese Weise sowohl Messungen zur Erstellung eines Förderzustandsdiagramms als auch Verschleißmessungen durchgeführt und wie im Folgenden erläutert, ausgewertet worden. So genannte Punktmessungen wurden hierfür erfasst und bilden wie anschließend dargestellt die kleinste Auswerteeinheit.

6.1 Beschreibung einer Punktmessung

Um Punkte in einem Förderzustandsdiagramm und bei Verschleißmessungen mit definierter Aussagekraft darstellen zu können, werden sog. Punktmessungen erstellt. Diese Punktmessungen erstrecken sich immer über 20s und setzen sich jeweils aus 100 Datensätzen zusammen, die wiederum mit 5Hz erfasst werden. Um in einem Zustand ohne Störeinflüsse der Absperrblasen messen zu können, wurden diese Punktmessungen jeweils während der fallenden Flanken des Graphen der Datenerfassung der Wägezelle aufgenommen, Abbildung 6.1-1. Die blauen Markierungen in Abbildung 6.1-1 skizzieren die Grenzen des Bereichs der fallenden Flanke der Wägezellenmessung in dem die Punktmessungen liegen.

Während des Absperrblasenbetriebs auf der steigenden Flanke des Graphen der Datenerfassung der Wägezelle sind, wie Abbildung 6.1-2 darstellt, der kontinuierlichen Entnahme von Fördergut die diskontinuierliche Fördergutzuführung und Störungen aufgrund unterschiedlicher Kompensatorbalgabstoßung überlagert, siehe auch Gleichung (4.4.5.1).

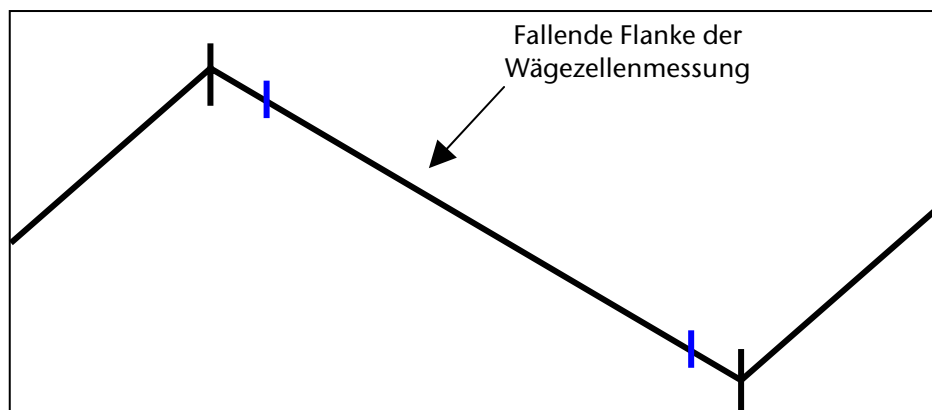


Abbildung 6.1-1: Schematischer Flankenverlauf der Wägezellenmessung

Die vorgegebene Massenabnahme im Vorratsbehälter durch die pneumatische Förderung und die hieraus resultierende Dauer einer abnehmenden Flanke wurden durch die Erstellung eines Zweipunktreglers generiert. Hierfür wurden eine obere und eine untere Grenze des Füllstandes im Vorratsbehälter festgelegt. Beim Überschreiten der oberen Grenze, die je nach Förderzustand und dem daraus resultierenden Druckverhältnissen in der Regel zwischen 17 kg und 31 kg variiert wurde, schalteten sich die Absperrblasen auf den Sperrzustand und es erfolgte nur noch die Fördergutentnahme aus dem Vorratsbehälter, bis die untere Grenze des Zweipunktreglers erreicht wurde. Diese lag normalerweise zwischen 15 kg und 2,5 kg und ihre Unterschreitung veranlasste den Start der Förderfunktion der Absperrblasen. Aufgrund der Verwendung des Zweipunktreglers sind ein Überspringen nach Erreichen des oberen Schaltpunktes und ein Unterschwingen nach Erreichen des unteren Schaltpunktes zu erwarten. Da nach dem Stopp der Absperrblasentätigkeit der Druck im Fluidisierer noch geringfügig zunimmt, wölbt sich der Flankenverlauf der Wägezellenmessung. Diese Wölbung ist zu Beginn der fallenden Flanke besonders stark. Damit der Druck im Fluidisierer zunehmen kann, muss Luft in den Fluidisierer fließen, welche demnach nicht durch die Förderleitung strömt. Hierdurch ändert sich die Förderung geringfügig. Um die Aufnahme eines durch diese Effekte begründeten systematischen Fehlers in die Datenbasis zu minimieren, erfolgt der Start der Datenerfassung nach visueller Beurteilung, wenn die Wölbung des Flankenverlaufs der Wägezellenmessung nicht mehr so stark ausgebildet ist. Die blaue Gerade in Abbildung 6.1-2 verdeutlicht den für die Erfassung von Punktmessungen manuell ausgewählten Bereich auf einer fallenden Flanke.

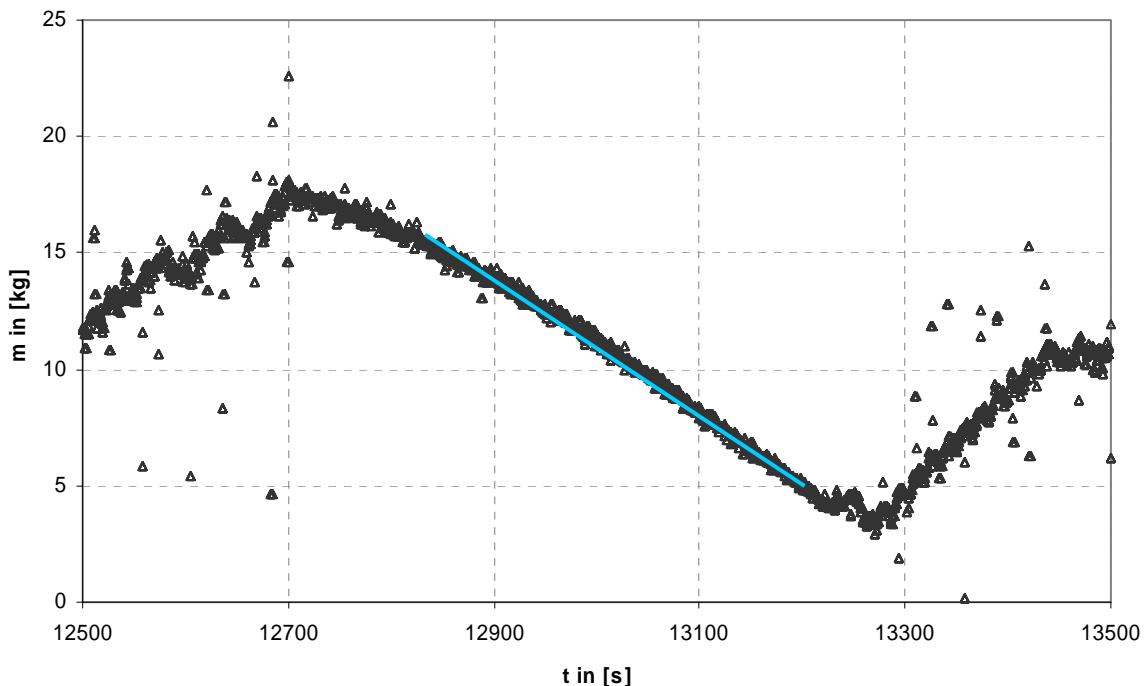


Abbildung 6.1-2: Flankenverlauf der Wägezellenmessung

Eine Punktmessung ergibt wie der Name andeutet einen Punkt im Förderzustandsdiagramm. Die Erfassung und Auswertung der Daten in Form von Punktmessungen wurde verwendet, um unterschiedliche Versuchsreihen miteinander vergleichen zu können und die spätere Durchführung einer FFT zu ermöglichen. Das zeitliche Intervall zur Aufnahme eines Punktes ist mit 20s festgelegt worden, da sich innerhalb dieser Zeit einerseits der Druck nicht wesentlich ändert, andererseits die Zeitspanne lang genug ist, damit mindestens mehr als zwei Förderzyklen ablaufen können (Shannon Theorem) und somit stabile Messbedingungen vorliegen. Hierbei ist ein Förderzyklus als die Zeit festgelegt in der eine Strähne oder ein Ballen theoretisch die gesamte Förderstrecke durchläuft. Das Abtasttheorem nach Nyquist und Shannon besagt dabei, dass ein kontinuierliches Signal, welches Frequenzen zwischen 0Hz und f_{maximal} enthält mit einer Frequenz $> 2 \cdot f_{\text{maximal}}$ äquidistant abgetastet werden muss, damit aus dem gewonnenem zeitdiskreten Verlauf das zugrunde liegende Signal z. B. approximiert werden kann, [Mey11].

Darüber hinaus stellte sich heraus, dass bei den Messreihen der Wägezellenmessung eine sinnvolle Mittelung ebenfalls für ein Zeitintervall von 20s erzielt werden kann. Das Ergebnis war eine erhöhte Massendifferenz, die eine bestmögliche Durchführung der Messreihen gewährleistete. Damit war es nun möglich, Massenströme bzw. Massendifferenzen reproduzierbar zu erfassen.

Vor Beginn einer Messung wurde der Druckabfall über die Förderstreckenlänge eingestellt und die entsprechende Wägezellenskalierung ausgewählt. Exemplarisch stellt Abbildung 6.2.1-1 am Beispiel der ersten fallenden Flanke der Wägezellenmessung von Messung 14 die Wägezellenmesswerte von acht aufeinander folgenden Punktmessungen dar.

6.1.1 Umgebungsparameter einer Punktmessung und ihre Genauigkeiten

Die Umgebungsbedingungen Umgebungstemperatur t_{Umgebung} und Umgebungsluftdruck p_{Umgebung} ergänzen die Parameter einer Punktmessung. Vor jeder Messung wurde der aktuelle Umgebungsluftdruck von der Wetterstation des Institutes für Elektrische Informationstechnik der TU-Clausthal übernommen und die Umgebungstemperatur mit einem kalibrierten Digitalthermometer an der Anlage am Messort des MDM3 bestimmt. Hierbei wurde eine möglichst konstante Umgebungstemperatur von 21°C während der Messungen angestrebt. Eine Vergleichsmessung der Umgebungstemperaturen an den Messorten des MDM1 und MDM3 ergab eine Temperaturdifferenz von $1,0^{\circ}$.

Der festgestellte aktuelle Umgebungsluftdruck wurde jeweils vor Beginn der Messung manuell in das Programm zur Messwerterfassung aufgenommen. Hierin erfolgte seine Verwendung zur Berechnung und online-Visualisierung abgeleiteter Größen in dem in Labview generierten Messprogramm.

Ebenfalls sind die Umgebungstemperatur und der Umgebungsluftdruck der Messung zusätzlich schriftlich dokumentiert worden. Die Genauigkeiten des Umgebungsluftdrucks und der Umgebungstemperatur werden mit $\pm 1\text{hPa}$ und $\pm 1^{\circ}\text{C}$ angenommen.

In die nachfolgende Berechnung des Förderluftdurchflusses in Kapitel 6.2.3 gehen der Umgebungsluftdruck und die Umgebungstemperatur über die Förderluftdichte wie in den Gleichungen (6.2.3.1), (6.2.3.2) und (6.2.3.3) beschrieben ein.

Die gewählten Standardbedingungen sind

- Umgebungs-Temperatur von 21°C
- Umgebungsdruck von $1,01325\text{ bar}$

6.2 Messungen zur Darstellung eines Förderzustandsdiagramms

Zur vergleichenden Darstellung der Zustände der pneumatischen Förderung dient das Förderzustandsdiagramm. Die abgeleiteten Größen $\Delta p/L$, v_0 und $\dot{m}_{\text{Fördergut}}$ bzw. μ spannen das Förderzustandsdiagramm auf.

Innerhalb einer Messung sind während der in Kapitel 6.1 beschriebenen Flanken Daten in Form von Punktmessungen zur Darstellung eines Förderzustandsdiagramms erfasst worden. Hierbei ist an der Pilotanlage vor jeder Messung der Durchfluss des Fördermediums über das Hauptregelventil für das Fördergas am Bedienpult eingestellt und am Vorratsbehälter gemessen worden. Weiterhin erfolgte die Änderung des Fördergutmassenstroms mit dem Regelschieber am Ausgang des Fluidisierers. Diese Fördergutmassenstromänderung fand jeweils zu Beginn einer ansteigenden Flanke statt, bevor während der folgenden fallenden Flanke die Punktmessungen erfasst wurden. Um für die spätere Darstellung eines Förderzustandsdiagramms Aussagen über weitere Bereiche treffen zu können, fand dementsprechend hiermit eine Veränderung der relevanten Größen $\Delta p/L$, v_0 und $\dot{m}_{\text{Fördergut}}$ bzw. μ zwischen den verschiedenen Punktmessungen statt, die das Förderzustandsdiagramm aufspannen.

Während der Erfassung der einzelnen Punktmessungen über jeweils 20s wurde jeweils eine möglichst gleich bleibende Förderung im Messbetrieb angestrebt, wobei die für die zu betrachtenden Förderzustände aussagekräftigen Bereiche des Förderzustandsdiagramms ermittelt wurden. Im Folgenden wird die Berechnung der abgeleiteten Größen $\Delta p/L$, v_0 , $\dot{m}_{\text{Fördergut}}$ und μ aus den Daten der Punktmessungen der durchgeführten Messungen erläutert.

6.2.1 Berechnung des Fördergutmassenstroms

Die Fördergutmasse in kg dargestellt über die Messzeit in s entspricht der Darstellung der aktuellen Messwerte der Wägezelle. Für jede Punktmessung wird eine lineare Regression des zeitlichen Verlaufs der Wägezellenmesswerte in Excel durchgeführt. Die Steigung dieser linearen Näherungsgleichung ist der mittlere Fördergutmassenstrom, der während dieser Punktmessung aus dem Fluidisierer strömt. Mit geänderten Vorzeichen ist dies der mittlere Fördergutmassenstrom der i -ten Punktmessung $\dot{m}_{\text{Fördergut},i}$ in kg/s .

Abbildung 6.2.1-1 stellt exemplarisch acht Punktmessungen innerhalb einer Messung dar. Ebenfalls enthalten sind die linearen Ausgleichsgeraden für die Wägezellenmasse der acht Punktmessungen, y_1 bis y_8 .

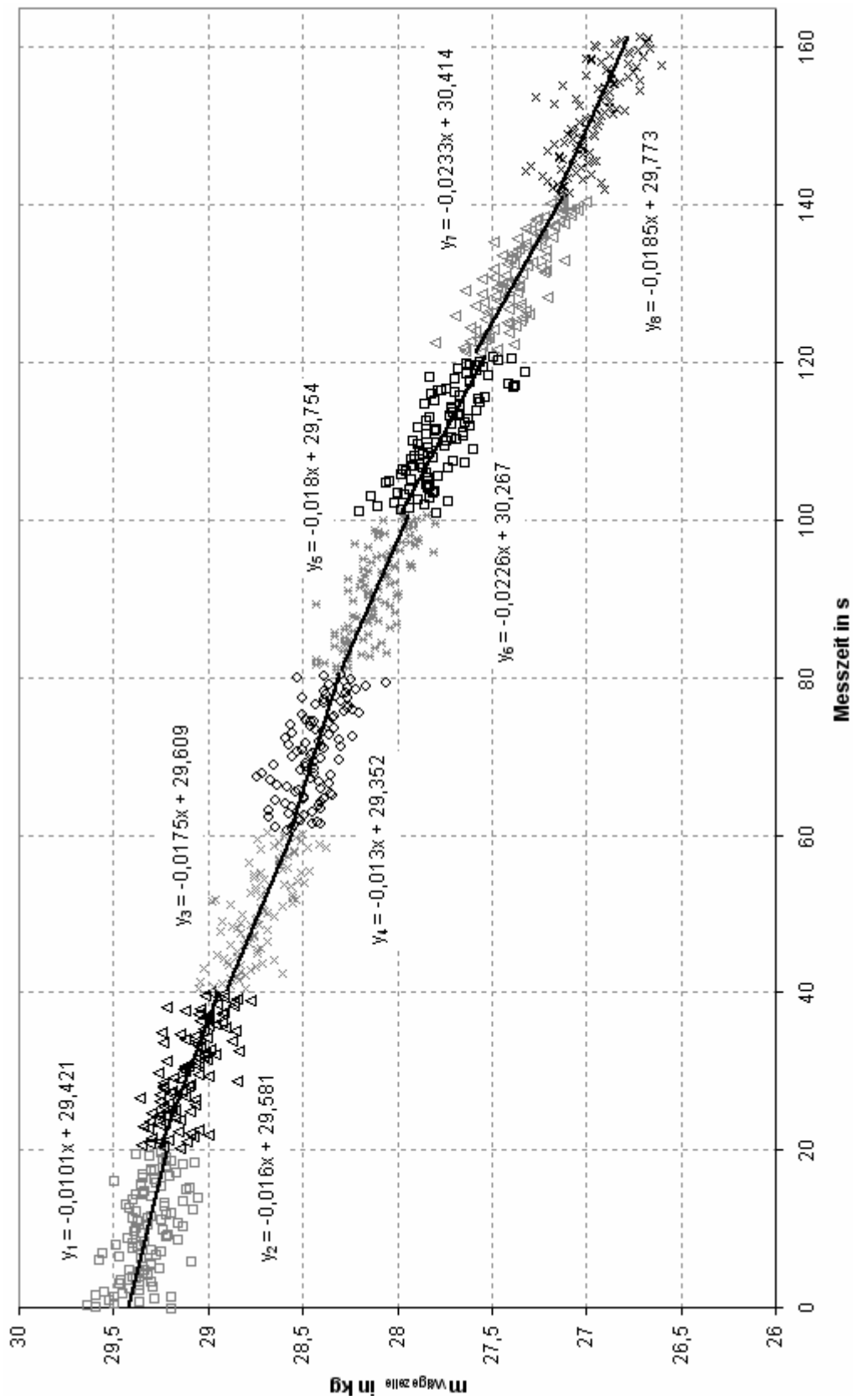


Abbildung 6.2.1-1: Exemplarische Fördergutmassenstrombestimmung aus Wägezellenmesswerten der Punktmessungen aus Flanke 1 von Messung 14

6.2.2 Berechnung der auf die Förderstreckenlänge bezogenen Druckdifferenz

Die DMU sind zu Beginn DMU1 und am Ende DMU2 der Förderstrecke eingebaut. Über sie lässt sich die Druckdifferenz über die gesamte Förderstreckenlänge L von $20m$ ermitteln. Der Mittelwert über $j = 100$ Datensätze ergibt somit die auf die Förderstreckenlänge bezogene mittlere Druckdifferenz der i -ten Punktmessung $\Delta p_i / L$. Die abgeleitete Größe $\Delta p_i / L$ des mittleren Druckverlustes über die Förderstreckenlänge einer Punktmessung i berechnet sich demnach gemäß Gleichung (6.2.2.1).

$$\frac{\Delta p_i}{L} = \frac{\sum_{j=1}^{100} p_{DMU1,i,j} - p_{DMU2,i,j}}{100 \cdot L} \quad (6.2.2.1)$$

6.2.3 Berechnung der Förderluftdichte

An den Messorten des MDM1 und MDM3 erfolgte eine Vergleichsmessung zwischen den Fördergastemperaturen in der Förderleitung. Diese Vergleichsmessung ergab, dass beide Temperaturen eine maximale Temperaturdifferenz von $0,2^\circ C$ aufwiesen. Ebenfalls wurden während dieser Vergleichsmessung auch die Umgebungstemperaturen an den Messorten des MDM1 und MDM3 betrachtet. Alle vier Temperaturen weichen maximal um $1,0^\circ C$ voneinander ab. Die am Messort des MDM3 erfasste Umgebungstemperatur wurde im Weiteren auch als Förderlufttemperatur in der Förderleitung verwendet.

Die für Gleichung (6.2.3.1) notwendige Dichte des Fördermediums einer Punktmessung i ist mit den Gleichungen (6.2.3.2) und (6.2.3.3) am Anfang $k = a$ und Ende $k = e$ der Förderleitung bestimmt worden.

$$Q_{V,L,k,i} = \frac{Q_{m,L,i}}{\rho_{L,k,i}} \quad (6.2.3.1)$$

$$\rho_{L,a,i} = \frac{(p_{Umgebung} + (\bar{p}_{DMU1,i} \cdot 1000)) \cdot 100}{287,058 \cdot (273,15 + t_{Umgebung})} \quad (6.2.3.2)$$

$$\rho_{L,e,i} = \frac{(p_{Umgebung} + (\bar{p}_{DMU2,i} \cdot 1000)) \cdot 100}{287,058 \cdot (273,15 + t_{Umgebung})} \quad (6.2.3.3)$$

mit:

$Q_{m,L,i}$ = Massenstrom des Fördermediums Luft während der Punktmessung i in kg / h

$Q_{V,L,k,i}$ = Volumenstrom des Fördermediums Luft am Ort k während der Punktmessung i
in m^3 / h

$\rho_{L,k,i}$ = Dichte des Fördermediums Luft am Ort k während der Punktmessung i
in kg / m^3

$k = a$ = Messort des DMU1 am Anfang der Förderstrecke

$k = e$ = Messort des DMU2 am Ende der Förderstrecke

$\overline{p}_{DMU1,i}$ = Mittelwert des Drucks am DMU1 während der Punktmessung i in *bar*

$\overline{p}_{DMU2,i}$ = Mittelwert des Drucks am DMU2 während der Punktmessung i in *bar*

$p_{Umgebung}$ = Umgebungsdruck zu Beginn der Messung in *mbar*

$t_{Umgebung}$ = Umgebungstemperatur zu Beginn der Messung in °C

6.2.4 Berechnung der Leerrohrgeschwindigkeit

Die Leerrohrgeschwindigkeit oder auch eingestellte mittlere Gasgeschwindigkeit einer Punktmessung $v_{0,i}$ entspricht der Fördergasgeschwindigkeit, welche das Fördermedium in der leeren Förderstrecke annehmen würde. Unter der Voraussetzung, dass die Absperrblasen dicht sind kann der für die Berechnung der Fördergasgeschwindigkeit notwendige Fördergasstrom am Einlauf oder am Auslauf gemessen werden, wobei ein Teil des verwendeten Fördergases zur Fluidisierung verwendet wird. Um die Dichtheit des Systems zu überprüfen, wurde am Ende der Förderstrecke vor dem Filter ein kalibriertes Manometer angebracht, beide Absperrblasen in den geschlossenen Zustand versetzt, das Förderstreckenende verschlossen und das Fördersystem mit *2bar* Überdruck beaufschlagt. In diesem Zustand konnte die Dichtheit des Systems festgestellt werden. Somit kann zur Berechnung der Fördergasgeschwindigkeit zu Beginn der pneumatischen Förderstrecke über den MDM3 der Gasvolumenstrom in dem noch nicht mit Fördergut beaufschlagten Streckenabschnitt gemessen werden, siehe Abbildung 4.4-1. Bedingt durch den während einer Punktmessung i über *20s* auftretenden Fördergutmassenstrom $\dot{m}_{Fördergut,i}$ verlässt eine definierte Quarzsandmasse den Fluidisierer. Über die Dichte aus Tabelle 5.2-1 ist ihr Volumen berechenbar. Dieses Volumen wird durch in den Druckbehälter einströmendes Fördergas bei bekanntem Druck ersetzt. Damit kann der Betriebsdruck im Fluidisierer als konstant betrachtet werden. Der hiermit korrigierte aus der Messung des MDM3 am Anfang der Förderstrecke erhaltene und für die Förderung relevante Fördergasmassenstrom $\dot{Q}_{m,L,i}$ dieser Punktmessung i ist über Gleichung (6.2.3.1) und die Dichtegleichungen (6.2.3.2) und (6.2.3.3) in den jeweiligen Fördergasvolumenstrom $\dot{Q}_{V,L,k,i}$ der Punktmessung am Anfang $k = a$ oder Ende $k = e$ der Förderstrecke umrechenbar. Während der Punktmessung ergeben sich mit Gleichung (6.2.4.1) die Fördergasgeschwindigkeiten der leeren Förderstrecke $v_{L,k,i}$ am Anfang $k = a$ und Ende $k = e$ der Förderleitung, mit denen der Fördergasvolumenstrom an den betrachteten Orten jeweils durch die Leitungsquerschnittsfläche strömt.

$$v_{L,k,i} = \frac{\dot{Q}_{V,L,k,i}}{3600 \frac{s}{h} \cdot q_{Leit}} \quad (6.2.4.1)$$

mit:

$v_{L,k,i}$ = Geschwindigkeit des Fördermediums Luft am Ort k während der Punktmessung i
in *m / s* ohne Fördergut

$\dot{Q}_{V,L,k,i}$ = Volumenstrom des Fördermediums Luft am Ort k während der Punktmessung i
in *m³ / h*

q_{Leit} = Leitungsquerschnittsfläche = *0,000132732m²*

$k = a$ = Messort des DMU1 am Anfang der Förderstrecke

$k = e$ = Messort des DMU2 am Ende der Förderstrecke

Die für die Darstellung der Punktmessungen im Förderzustandsdiagramm verwendete Leerrohrgeschwindigkeit $v_{0,i}$ ist der arithmetische Mittelwert der beiden Gasgeschwindigkeiten $v_{L,a,i}$ und $v_{L,e,i}$.

6.2.5 Berechnung der Beladung

Die Beladung während einer Punktmessung i ist mit Gleichung (6.2.5.1) beschreibbar.

$$\mu_i = \frac{\dot{m}_{\text{Fördergut},i}}{Q_{m,L,i}} \quad (6.2.5.1)$$

mit:

μ_i = Beladung während der Punktmessung i

$\dot{m}_{\text{Fördergut},i}$ = Massenstrom des Fördergutes während der Punktmessung i in kg/s

$Q_{m,L,i}$ = für die Förderung relevanter Massenstrom des Fördermediums während der Punktmessung i in kg/s

Auch hier wird der korrigierte Fördergasmassenstrom $Q_{m,L,i}$ dieser Punktmessung i der Berechnung zugrunde gelegt, der über die Gleichungen (6.2.3.1), (6.2.3.2) und (6.2.3.3) aus dem Fördergasvolumenstrom $Q_{V,L,k,i}$ berechenbar ist.

6.2.6 Abgeleitete Größen einer Punktmessung zur Darstellung im Förderzustandsdiagramm und ihre Genauigkeiten

Die Tabelle 6.2.6-1 führt die abgeleiteten Größen einer Punktmessung zur Darstellung der hier betrachteten pneumatischen Förderung in einem Förderzustandsdiagramm mit ihren Genauigkeiten auf. Die in den Förderzustandsdiagrammen von Kapitel 7 dargestellten und für die mathematische Modellrechnung zugrunde gelegten Punkte beinhalten jeweils diese Genauigkeiten.

Größe	Einheit	Abweichung in %
$\dot{m}_{\text{Fördergut},i}$	kg/s	2,9 bis 9,4
$\Delta p_i / L$	Pa/m	4,1 bis 6,5
$v_{0,i}$	m/s	1 bis 2
μ_i	–	4 bis 12

Tabelle 6.2.6-1: Genauigkeiten der Parameter des Förderzustandsdiagramms

6.3 Modellberechnungen zur Darstellung des Förderzustandsdiagramms

Ausgehend von der hierfür gültigen Druckverlustgleichung (3.1) dient das mathematische Modell aus Kapitel 3 zur Modellierung des Druckkennlinienverlaufs im Strählen- und Pfropfenbereich. In diesem weiter untersuchten Förderzustandsbereich sinkt wie auch [Wir80] feststellt, die Druckkennlinie konstanten Fördergutmassenstroms mit steigender Leerrohrgeschwindigkeit, solange sich die Strähnenförderung noch nicht vollständig ausgeprägt hat.

Die abgeleiteten Größen $\lambda_{tot,i}$, $v_{0,i}$, μ_i , $\rho_{L,i}$ und $(t_L/t_F)_i$ von jeweils fünf Punktmessungen, die sowohl in ihrer Fördergutmassenstromkategorie als auch in ihrem Förderzustand übereinstimmen und zur Strähnen- oder Pfropfenförderung gehören, bilden jeweils die Grundlage für die Berechnungen gemäß dieses mathematischen Modells. Der Berechnungsweg beginnt mit der Bestimmung von λ_{tot} mit Gleichung (3.2), in der die über die Förderstrecke gemittelte Dichte des Fördermediums aus Gleichung (6.3.1) eingesetzt wird, sowie die Drücke am Anfang und Ende der Förderstrecke. Somit liegt der λ_{tot} -Berechnung die Betrachtung der gesamten Förderstrecke zugrunde und für eine Punktmessung i gilt die sich auf Gleichung (3.2) beziehende Gleichung (6.3.2).

$$\rho_{L,i} = \frac{\rho_{L,a,i} + \rho_{L,e,i}}{2} \quad (6.3.1)$$

$$\lambda_{tot,i} = \frac{p_{a,i}^2 - p_{e,i}^2}{2 \cdot p_{e,i}} \cdot \frac{D}{L} \cdot \frac{2}{\rho_{L,i} \cdot v_{e,i}^2} \quad (6.3.2)$$

Die Logarithmierung der dimensionslosen Gleichung (3.6), die als das Ergebnis der in Kapitel 3 beschriebenen Dimensionsanalyse nach [Szi90] angesehen werden kann, führt zu Gleichung (6.3.3). Über Gleichung (6.3.3) können die fünf unbekannten Koeffizienten a bis e , die für einen Förderzustand und eine Fördergutmassenstromkategorie gemäß der getroffenen Auswahl der fünf Punktmessungen Gültigkeit besitzen, mit dem Gaußschen Eliminationsverfahren bestimmt werden.

$$\ln(\lambda_{tot,i}) = a \cdot \ln\left(\frac{v_{0,i}^2}{D \cdot g}\right) + b \cdot \ln(\mu_i) + c \cdot \ln\left(\frac{d_{50}}{D}\right) + d \cdot \ln\left(\frac{\rho_F}{\rho_{L,i}}\right) + e \cdot \ln\left(\frac{t_L}{t_F}\right)_i \quad (6.3.3)$$

Hierbei ist aus dem Mittelwert des Signals des LSW1 über die Dauer einer Punktmessung i von 20s für das für die Förderung charakteristische Zeitverhältnis $(t_L/t_F)_i$ jeweils das Ergebnis von Gleichung (6.3.4) in Gleichung (6.3.3) des mathematischen Modells einzusetzen.

$$\left(\frac{t_L}{t_F}\right)_i = \frac{\left(-\overline{U_{LSW1,20s,i}} + 5V\right) \cdot \frac{20s}{5V}}{\overline{U_{LSW1,20s,i}} \cdot \frac{20s}{5V}} \quad (6.3.4)$$

Nach Umstellung von Gleichung (3.7) wird die resultierende Gleichung (6.3.5) mit den ermittelten Koeffizienten a bis e in einem Excel-Diagramm dargestellt.

Mit dem Trend $y = x^{1+b+f}$ sollte der für diesen Förderzustand und diese Fördergutmassenstromkategorie gültige Exponent f bestimmt werden.

$$\frac{\frac{dp}{dL}}{\left(\left(\frac{v_0^2}{D \cdot g} \right)^a \cdot \left(\frac{d_{50}}{D} \right)^c \cdot \left(\frac{\rho_F}{\rho_L} \right)^d \cdot \left(\frac{t_L}{t_F} \right)^e \right) \cdot \frac{\rho_L \cdot v_0^2}{D \cdot 2}} = \mu^{1+b+f} \quad (6.3.5)$$

Da diese Trendbestimmung zu keiner zufriedenstellenden Übereinstimmung führte, wurden die beiden Unbekannten m und f aus dem Trend $y = m \cdot x^{1+b+f}$ ermittelt, siehe Gleichung (6.3.6).

$$\frac{\frac{dp}{dL}}{\left(\left(\frac{v_0^2}{D \cdot g} \right)^a \cdot \left(\frac{d_{50}}{D} \right)^c \cdot \left(\frac{\rho_F}{\rho_L} \right)^d \cdot \left(\frac{t_L}{t_F} \right)^e \right) \cdot \frac{\rho_L \cdot v_0^2}{D \cdot 2}} = m \cdot \mu^{1+b+f} \quad (6.3.6)$$

Zum Vergleich von $\Delta p_i/L$ der Punktmessung i des Experiments mit dem dp_i/dL des mathematischen Modells können die ermittelten Koeffizienten a bis e in die Exponenten der Faktoren der Druckverlustgleichung (3.8) sowie m -Wert und f -Wert eingesetzt werden, wie Gleichung (6.3.7) zeigt.

$$\frac{dp_i}{dL} = m \cdot \mu_i^{(1+b+f)} \cdot v_{0,i}^{(2a+2)} \cdot d_{50}^c \cdot D^{(-a-c-1)} \cdot \rho_F^d \cdot \rho_{L,i}^{(1-d)} \cdot \left(\frac{t_L}{t_F} \right)_i^e \cdot g^{-a} \cdot 0,5 \quad (6.3.7)$$

Ebenso können für diesen Vergleich in die Druckverlustgleichung (3.1) nun jeweils der m -Wert als Faktor vor der Leerrohrgeschwindigkeit und der f -Wert als Exponent der Leerrohrgeschwindigkeit eingesetzt werden, wie in Gleichung (6.3.8) dargestellt.

$$\frac{dp_i}{dL} = \frac{\mu_i \cdot \lambda_{tot,i} \cdot v_{0,i}^2 \cdot \rho_{L,i}}{D \cdot 2} \cdot m \cdot \mu_i^f \quad (6.3.8)$$

Die in den Gleichungen (6.3.1) bis (6.3.8) zur Anwendung des mathematischen Modells aus Kapitel 3 zur Darstellung der pneumatischen Förderung der Pilotanlage in einem Förderzustandsdiagramm verwendeten Konstanten und Variablen sind:

$$g = \text{Erdbeschleunigung} = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$D = \text{Förderleitungsinne Durchmesser} = 0,013 \text{ m}$$

$$L = \text{Förderstreckenlänge} = 20 \text{ m}$$

$$d_{50} = \text{mittlerer Fördergutpartikeldurchmesser bei 50\% der Rückstandssummenkurve } R$$

$$\text{der Korngrößenanalyse des Fördergutes} = (389,93 \pm 0,91) \cdot 10^{-6} \text{ m aus der}$$

$$\text{statistischen Auswertung der Analysedaten der 3 Einzelmessungen mit neuem Sand}$$

$$\text{zur Bestimmung der Korngrößenverteilung vom 06.08.2007 s. Anhang A}$$

$$\rho_F = \text{Dichte des Fördergutes} = 2650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ aus [Qua03]}$$

a, b, c, d, e, f, m = reelle Zahlen

i = Index für ausgewählte Punktmessung; ohne diesen Index kann sich der Parameter auf mehrere Punktmessungen beziehen

$\rho_{L,a,i}$ = Dichte des Fördermediums am Messort des DMU1 am Anfang der Förderstrecke der Punktmessung i in kg/m^3

$\rho_{L,e,i}$ = Dichte des Fördermediums am Messort des DMU2 am Ende der Förderstrecke der Punktmessung i in kg/m^3

$\rho_{L,i}$ = über Förderstrecke gemittelte Fördermediumdichte der Punktmessung i in kg/m^3

$\lambda_{tot,i}$ = Gesamtreibungsbeiwert der Punktmessung i

$p_{a,i}$ = Mittelwert des Drucks am Messort des DMU1 am Anfang der Förderstrecke der Punktmessung i in N/m^2

$p_{e,i}$ = Mittelwert des Drucks am Messort des DMU2 am Ende der Förderstrecke der Punktmessung i in N/m^2

$v_{e,i}$ = Leerrohrgeschwindigkeit am Ende der Förderstrecke der Punktmessung i in m/s

$v_{0,i}$ = über Förderstrecke gemittelte Leerrohrgeschwindigkeit der Punktmessung i in m/s

μ_i = Beladung der Punktmessung i

$\Delta p_i / L$ = Druckverlust des Experiments bezogen auf die reale Förderstreckenlänge der Punktmessung i in $(N/m^2)/m$

dp_i / dL = Druckverlust bezogen auf Förderstreckenlänge der Punktmessung i in $(N/m^2)/m$

$\overline{U}_{LSW1,20s,i}$ = Mittelwert des LSW1-Signals über Dauer der Punktmessung i von 20s in V

$(t_L / t_F)_i$ = für die pneumatische Förderung charakteristisches Förderzeitenverhältnis der Punktmessung i mit:

t_L = mittlere Zeitspanne zwischen zwei aufeinander folgenden Fördergutpfropfen bzw. -strähnen in s und

t_F = mittlere Zeitspanne eines Fördergutpfropfens bzw. einer -strähne in s

Größe	Einheit	Abweichung in %
$\dot{m}_{\text{Fördergut},i}$	kg/s	2,9 bis 9,4
$\lambda_{\text{tot},i}$	–	3 bis 5
$Fr = v_{0,i}^2 / (D \cdot g)$	–	2 bis 4
μ_i	–	4 bis 12
(d_{50}/D)	–	3 bis 8
$(\rho_F / \rho_{L,i})$	–	4 bis 8
$(t_L / t_F)_i$	–	8 bis 10
$v_{0,i}$	m/s	1 bis 2
$\Delta p_i / L$	Pa/m	4,1 bis 6,5

Tabelle 6.3-1: Abgeleitete Größen einer Punktmessung zur Modellberechnung im Förderzustandsdiagramm und ihre Genauigkeiten

Tabelle 6.3-1 betrachtet die zur Modellberechnung verwendeten abgeleiteten Größen einer Punktmessung mit ihren Genauigkeiten. Hierin enthalten sind auch die aus Tabelle 6.2.6-1 bekannten Parameter, weil den Modellberechnungen dieselben Punktmessungen zugrunde liegen. Dabei dient der Fördergutmassenstrom der i -ten Punktmessung $\dot{m}_{\text{Fördergut},i}$ der Auswahl der fünf Punktmessungen für die jeweilige Modellbetrachtung. Ebenso wird der Förderzustand „Übergang Ballen/Strähnen“ zur Punktmessungsauswahl genutzt. Hierfür wurde der Ansatz zur Trendbetrachtung in Gleichung 6.3.6 verwendet. Die abgeleiteten Größen $\lambda_{\text{tot},i}$, Fr , μ_i , (d_{50}/D) , $(\rho_F / \rho_{L,i})$ und $(t_L / t_F)_i$ dienen jeweils der Berechnung der fünf Modellkoeffizienten a bis e , wobei (d_{50}/D) sowie ρ_F für alle Modellberechnungen als konstant angesehen wurden. Darüber hinaus ist im Bereich der Strähnenförderung für die abgeleitete Größe $(t_L / t_F)_i$ eher eine Interpretierung als Querschnittsverhältnis denkbar. Der Parameter μ in Gleichung (6.3.6) ist die unabhängige Variable der Trendgleichung $y = m \cdot \mu^{1+b+f}$. Zum späteren Vergleich zwischen Modell und Experiment dienen dp_i/dL und $\Delta p_i/L$.

6.4 Verschleißmessungen

Da bei der Gutförderung in pneumatischen Systemen der Verschleiß an den Förderleitungen eine evidente Rolle spielt [Wyp93], [Kac05], wurden im Rahmen dieser Arbeit Verschleißversuche mit einer erhöhten Reibung zwischen der Förderleitung und dem Fördergut durchgeführt. Ziel dieser Versuche war das Erreichen von Erkenntnissen hinsichtlich des Verschleißbildes in der Förderleitung bei längeren Laufzeiten und erhöhten Reibungsbeiwert und die Gegenüberstellung der gewonnenen Ergebnisse mit der Literatur. Versuche hierzu wurden im Förderzustand der Ballenförderung ausgeführt, auf den die Pilotanlage im Vorfeld hin optimiert worden war.

Für die Verschleißversuche erfolgte der Einbau eines Cu-Rohres jeweils zu Beginn des Förderstreckenverlaufs. Die Dauer der Verschleißmessungen betrug 4 Stunden, so dass sich der an der Kupferrohrwand ausgebildete Verschleiß nicht nur auf die Zeiten des Messbetriebs, sondern auch auf die Zeiten des Schleusenbetriebes zurückführen lässt. Die Punktmessungen zur Beschreibung des eingestellten Zustandes während des Verschleißversuches konnten nur ausschließlich während des Messbetriebes aufgenommen werden. Während dieser Messungen wurde jeweils darauf geachtet, dass das Fördergut in einem kontinuierlichen Förderzustand gefördert wurde. Allerdings sind die Unsicherheiten für Verschleißmessungen im Vergleich zu den Messungen für die Erstellung von Förderzustandsdiagrammen durchführungsbedingt größer.

Nach [Ber99], [Gla77] und [Vog03] findet der größte Verschleiß im Förderleitungssystem in den Rohrleitungskrümmern statt. Untersuchungen zufolge nimmt nach [Hau⁺85] ebenfalls der Krümmer- und Rohrleitungsverschleiß mit der dritten Potenz der Fördergeschwindigkeit zu. Diese Tatsachen führten zur Umsetzung der Überlegung 90°-Bögen aus Kupferleitungen mit 13mm Innendurchmesser und 0,9mm Wandstärke in das Förderleitungssystem einzubinden.

Da bei Vorversuchen mit 45°-Rohrbögen nur marginaler Verschleiß erzielt wurde, fiel die Entscheidung, alle folgenden Verschleißversuche mit 90°-Rohrbögen durchzuführen. Abbildung 6.4 -1 zeigt ein hierfür verwendetes Cu-Rohr im Schnitt. Der Grund für diese Entscheidung war der deutlich höhere Verschleiß durch die engeren Radien.



Abbildung 6.4.-1: Cu-Rohr mit zwei 90°-Krümmern im Längsschnitt, rote Pfeile markieren die Stellen des höchsten Verschleißes

Somit lassen sich die Verschleißmessungen folgendermaßen zusammenfassend charakterisieren

- 2 Krümmer aus Cu-Rohr zusätzlich in den Förderstreckenverlauf integriert
- 90°-Krümmer
- Versuchsdauer 4 Stunden
- Möglichst durchgehend ein Förderzustand

6.4.1 Wägung der Cu-Rohre

Die für die Verschleißversuche eingesetzten Cu-Rohre wurden vor dem Versuch mit einer Analysenwaage gewogen und so das Ausgangsgewicht bestimmt. Nach Durchführung eines Verschleißversuchs von jeweils vier Stunden erfolgte stets die erneute Wägung des Cu-Rohres zur Ermittlung der Gewichtsreduzierung aufgrund des hohen Abriebs durch das Fördergut, siehe Tabelle 7.3-1. Die hierfür verwendete digitale Analysenwaage von Sartorius besitzt eine obere Wägebereichsgrenze von 166g . Ihre Ablesbarkeit liegt bei 0,01mg .

6.4.2 Berechnung des punktuellen Cu-Rohr-Verschleißes

Aus der Wanddickenmessung am längs aufgeschnittenen Cu-Rohr in mm und der Bestimmung der Fördergutmasse des gesamten Verschleißversuches $m_{\text{Verschleißmessung}}$ lässt sich der Krümmerverschleiß punktuell bestimmen, wodurch dieser graphisch darstellbar wird. Nach jeder vierstündigen Verschleißmessung wurde hierfür das verwendete Cu-Rohr in Längsrichtung geteilt. In Abbildung 6.4-1 ist die Strömungsrichtung des Fördergutes in das Cu-Rohr eingezeichnet und es sind die, bedingt durch den Verschleiß, dünneren Rohraussenwandabschnitte der Krümmer sehr gut zu erkennen. Diese näher betrachteten Rohraussenwandabschnitte haben jeweils eine Länge von 36mm und wurden in Abständen von 2mm mit Markierungen versehen, an denen danach die Wandstärke mit einem digitalen Messschieber ermittelt wurde. Hierbei wurde der erste Messpunkt an der Krümmeraussenwand jeweils so gewählt, dass er in Strömungsrichtung zu Beginn des Krümmerverlaufs lag und als Bezugspunkt festgelegt. Aus allen 18 Wanddickenmesswerten eines Krümmers wurde jeweils der Betrag zwischen Wanddicke zu besagtem Bezugswert bestimmt und dieser Betrag auf die Fördergutmasse bezogen, die während des gesamten Verschleißversuches gefördert wurde. Die hierfür benötigte Fördergutmasse des gesamten Verschleißversuches wurde aus dem mittleren Fördergutmassenstrom der Punktmessungen gemäß Gleichung (6.4.2.1) ermittelt.

$$m_{\text{Verschleißmessung}} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{m}_{\text{Fördergut},i}}{n} \cdot t_{\text{Verschleißmessung}} \quad (6.4.2.1)$$

mit:

$m_{\text{Verschleißmessung}}$ = Fördergutmasse des gesamten Verschleißversuches in kg

$\dot{m}_{\text{Fördergut},i}$ = Massenstrom des Fördergutes während der Punktmessung i in kg / s

$t_{\text{Verschleißmessung}}$ = Dauer des gesamten Verschleißversuches in s

n = letzte Punktmessung des Verschleißversuches

6.4.3 Berechnung der Cu-Rohr-Verschleißfläche

Bisher wurde der punktuelle Krümmerverschleiß als Waddickenreduzierung des längs aufgeschnittenen Cu-Rohres in mm bezogen bzw. normiert auf die gesamte, während des jeweiligen Verschleißversuches, geförderte Fördergutmasse in kg bestimmt. Durch die Aneinanderreihung dieser punktuellen Verschleißergebnisse eines Krümmers in Förderrichtung gewinnt die Verschleißbetrachtung eine weitere räumliche Dimension. In Förderrichtung (x-Richtung) werden die räumlichen Abstände der einzelnen Messpunkte an der Krümmeraussenwand ermittelt und in Verschleißrichtung (y-Richtung) die Änderungen des normierten punktuellen Verschleißes. Unter der Annahme, dass die geringen räumlichen Abstände der einzelnen Messpunkte an der Krümmeraussenwand als infinitesimal angesehen werden können, erfolgt eine abschnittsweise Verschleißflächenberechnung deren Aufsummierung einer numerischen Integration entspricht.

Die 18 Messpunkte oder entsprechend die $36mm$ jeder Krümmeraussenwand beschreiben die von der pneumatischen Förderung real genutzten 90° eines gedachten Krümmeraussenwandkreises mit einem Umfang von $144mm$. Der Radius dieses Krümmeraussenwandkreises beträgt somit $22,92mm$. Zur weiteren Normierung der auf die geförderte Fördergutmasse bezogenen Verschleißflächen erfolgt die Umrechnung von mm in x-Richtung in rad dieses Krümmeraussenwandkreises.

7 Darstellung und Diskussion der experimentellen Ergebnisse

7.1 Beschreibung der Förderzustände Ballen- und Strähnenförderung

An einer Auswahl generierter Mittelwerte repräsentativer Daten der Fördergutmassenstromkategorien 0,03 bis <0,04 kg/s und 0,04 bis <0,05 kg/s, siehe Tabellen B-1, B-2, B-3, B-4 und B-5, findet im Folgenden die statistische Charakterisierung der Förderzustände Ballenförderung, Übergang Ballen-/Strähnenförderung und Strähnenförderung statt. Die zugrunde liegenden Messwerte werden hinsichtlich des Schwingungsverhaltens des Fördersystems mittels FFT untersucht.

7.1.1 Korrelationen der Sensordaten mit dem Förderzustand

Die statistisch betrachteten Förderzustände sind die Ballenförderung (Dichtstrom), der Übergang Ballen-/Strähnenförderung und die Strähnenförderung (Übergang Dichtstrom, aber noch nicht Dünnstrom). Die Entscheidung, welcher Förderzustand vorliegt, erfolgte während der jeweiligen Messung visuell am Lichtschirm am zweiten 90°-Krümmer am Übergang vom horizontalen Bereich zum ersten senkrecht ansteigenden Förderstreckenverlauf. Über die gesamte Förderstreckenlänge konnte weiterhin visuell während der Messungen festgestellt werden, dass der gleiche Förderzustand sowohl am Lichtschirm als auch in den weiteren horizontalen Förderstreckenabschnitten näherungsweise vorlag. Charakteristisch für den senkrecht fallenden Förderstreckenverlauf war während aller Förderversuche die Fragmentierung der Ballen bzw. Strähnen aufgrund der in Förderrichtung wirkenden Gewichtskraft. Bei der visuellen Betrachtung des gesamten Förderstreckenverlaufs sind die zu erwartenden Förderzustände bei einer bestimmten Fördergutmassenstromkategorie erkennbar. Mit dieser Vorstellung geht die Förderung der Anlage in einem Bereich einer Kennlinie des Förderzustandsdiagramms einher, siehe Abbildung 7.2.1-2.

In Förderrichtung passiert das Fördergut zunächst den Dehnungsmessstreifen 1 (DMS1) gefolgt vom Licht-Spannungswandler 1 (LSW1) zu Beginn des ersten steigenden Streckenabschnittes. Später folgen im ersten fallenden Förderstreckenabschnitt zunächst der DMS2 und auf derselben absoluten Höhe wie LSW1 und DMS1 der LSW2 gefolgt vom DMS3. Zuletzt ist der DMS4 im letzten steigenden Förderstreckenabschnitt eingebaut. Das Fördermedium passiert dem Fördergut gegenüber zusätzlich den MDM3 zu Beginn der Förderstrecke und den MDM1 an ihrem Ende. Eine Auswahl von Messwerten dieser Sensoren wird bezüglich ihrer Verwendbarkeit für eine nichtvisuelle Charakterisierung des vorherrschenden Förderzustandes im Folgenden mit Hilfe der Abbildungen 7.1.1-1, 7.1.1-2, 7.1.1-3, 7.1.1-4, 7.1.1-5, 7.1.1-6 und 7.1.1-7 untersucht.

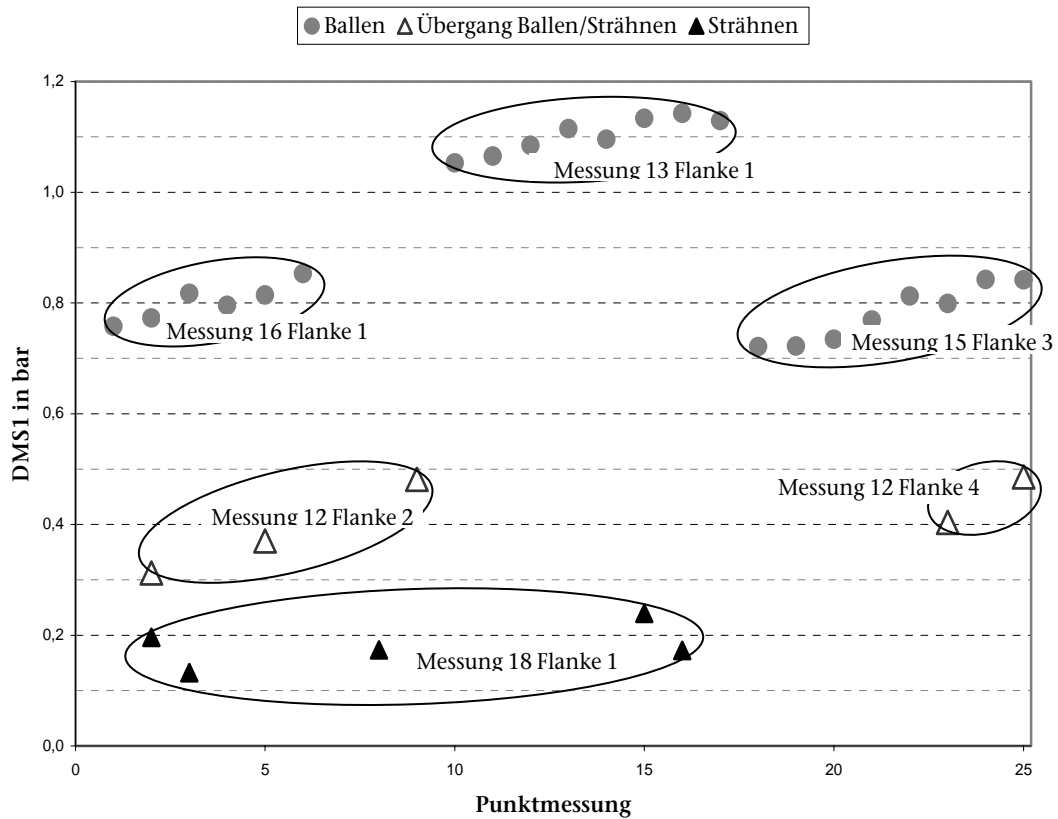


Abbildung 7.1.1-1: Mittelwerte der Punktmessungen von DMS1, vertikal-steigend, Förderstreckenanfang

Anhand von Mittelwerten über Punktmessungen des DMS1 ist in Tabelle B-1 und Abbildung 7.1.1-1 ein signifikanter Unterschied zwischen der Ballenförderung mit 0,7bar bis 1,1bar, dem Übergang Ballen-/Strähnenförderung bei 0,3bar bis 0,5bar und der Strähnenförderung bei 0,1bar bis 0,2bar zu erkennen. Tabelle B-1 und Abbildung 7.1.1-2 zeigen bei 2,0V bis 3,4V Ballenförderung, bei 0,9V bis 1,8V Ballen-/Strähnenförderung und bei 0,9V bis 1,4V Strähnenförderung. Hiermit ist der Ort zu Beginn des ersten steigenden Streckenabschnittes als Messort zur Charakterisierung des aktuellen Förderzustandes geeignet. Sowohl der DMS1 als der LSW1 liefern Werte, die zuverlässige Rückschlüsse auf den momentanen Förderzustand ermöglichen. An diesem Messort ist für das reale Fördergut Kohlenstaub ein DMS zur Ermittlung des aktuellen Förderzustandes verwendbar.

Mit dem Mittelwert des Spannungssignals des LSW1 über die Dauer der Punktmessung i von 20s, der aus Kapitel 6.3 auch als $\overline{U}_{LSW1,20s,i}$ bekannt ist, ist eine Aussage zum Förderzustand am Messort des LSW1 während dieser Punktmessung möglich. $\overline{U}_{LSW1,20s,i}$ wird in Gleichung (6.3.4) genutzt, um mit $(t_L/t_F)_i$ einen dimensionslosen Parameter zur Beschreibung mittlerer Zeitspannen von Fördergutpfropfen bzw. -strähnen und der Zeitspanne dazwischen bereitzustellen. Der so gewonnene Parameter $(t_L/t_F)_i$ dient im mathematischen Modell dieser Arbeit als Förderzeitenverhältnis der Charakterisierung der pneumatischen Förderung. Diesem Parameter $(t_L/t_F)_i$ können während Ballenförderung Werte von 0,5 bis 1,5, im Übergang Ballen-/Strähnenförderung Werte von 1,5 bis 2,5 und bei Strähnenförderung Werte von 2,5 bis 5,0 zugeordnet werden wie Abbildung 7.1.1-3 zeigt.

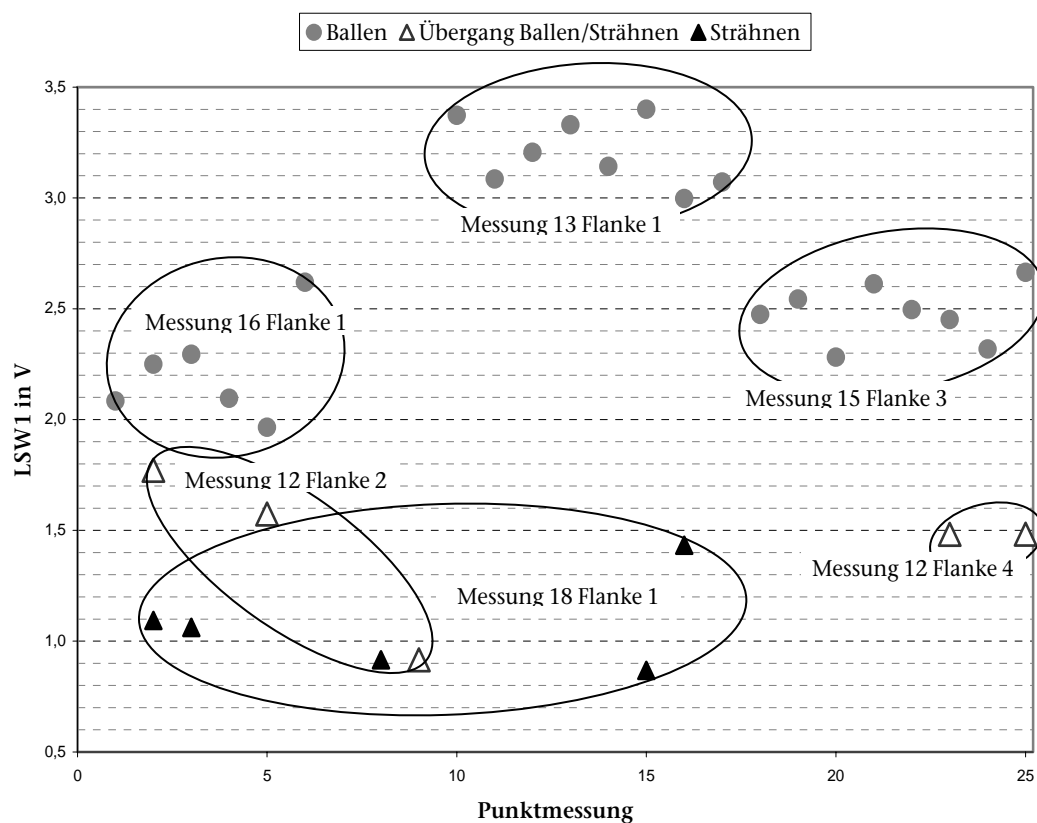


Abbildung 7.1.1-2: Mittelwerte der Punktmessungen von LSW1, vertikal-steigend, Förderstreckenanfang

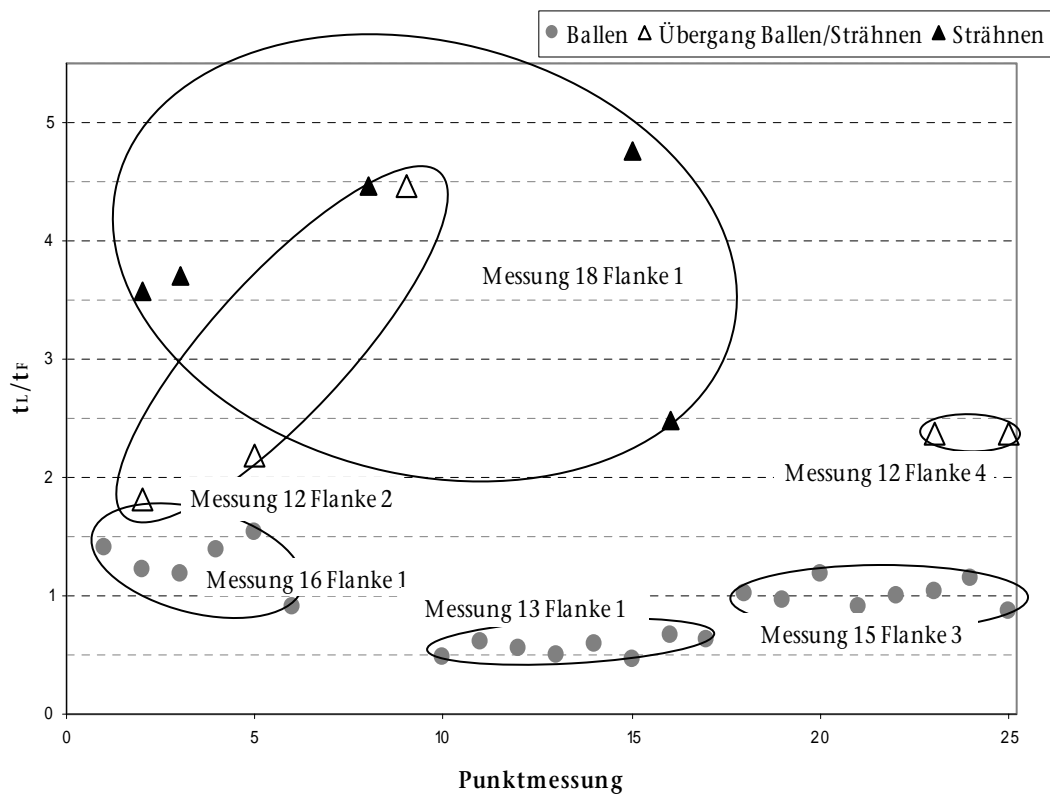


Abbildung 7.1.1-3: Parameter Förderzeitenverhältnis der ausgewählten Punktmessungen

Durch die Wirkung der Gewichtskraft in Förderrichtung folgt die Fragmentierung der Ballen bzw. Strähnen des Fördergutes, siehe [Saw61]. Sowohl mit dem DMS2, dessen Mittelwerte über jeweils eine der ausgewählten Punktmessungen in Tabelle B-1 und Abbildung 7.1.1-4 zu sehen sind, als auch dem DMS3, sind im fallenden Förderstreckenabschnitt die aktuellen Förderzustände dieses Streckenteils aufgrund des Phänomens dieser Fragmentierung bei Anwendung der vom DMS1 bekannten förderzustandscharakterisierenden Druckbereiche zuzuordnen. Relevante Aussagen zum Förderzustand mittels Dehnungsmessstreifen sind somit an steigenden, horizontalen und fallenden Streckenabschnitten möglich.

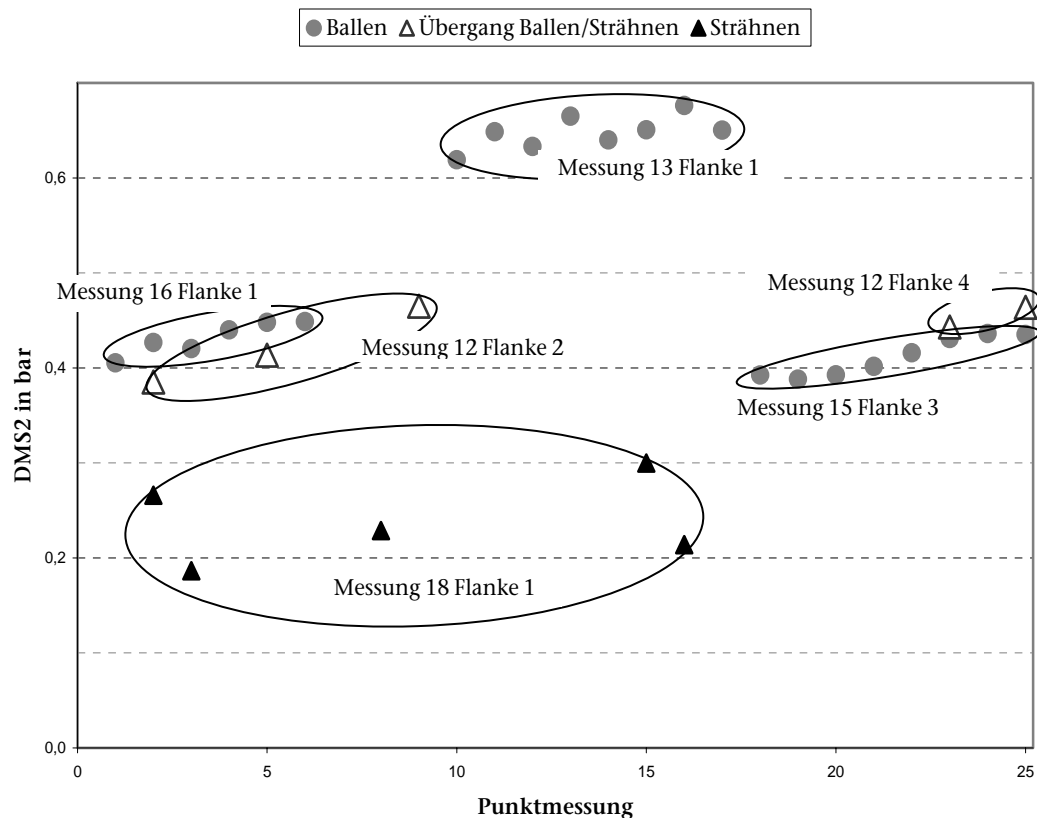


Abbildung 7.1.1-4: Mittelwerte der Punktmessungen von DMS2, vertikal-fallend, Förderstreckenmitte

Der LSW2, in unmittelbarer Nähe des DMS3 positioniert, zeigt mit 0,4V bis 1,1V die zu Strähnen fragmentierten Ballen und mit 0,1V bis 0,2V die weiter zu Strähnen zerfallenen ursprünglichen Förderzustände Strähnenförderung und Übergangsbereich Ballen-/Strähnenförderung, sowie die unterschiedlichen Förderraten des Fördergutes, siehe Abbildung 7.1.1-5 und Tabellen B-1 und B-3. Abbildung 7.1.1-6 veranschaulicht darüber hinaus diese Fragmentierung anhand der Gegenüberstellung der Mittelwerte der Punktmessungen von LSW1 und LSW2 im vertikal-steigenden bzw. vertikal-fallenden Streckenabschnitt. Im fallenden Abschnitt prägt sich die Strähnencharakteristik mehr aus. Hieraus ableitbar wäre der Vorschlag die pneumatische Förderung des Kohlenstaubes fallend der Blasform zuzuführen um Pulsationen zu vermeiden.

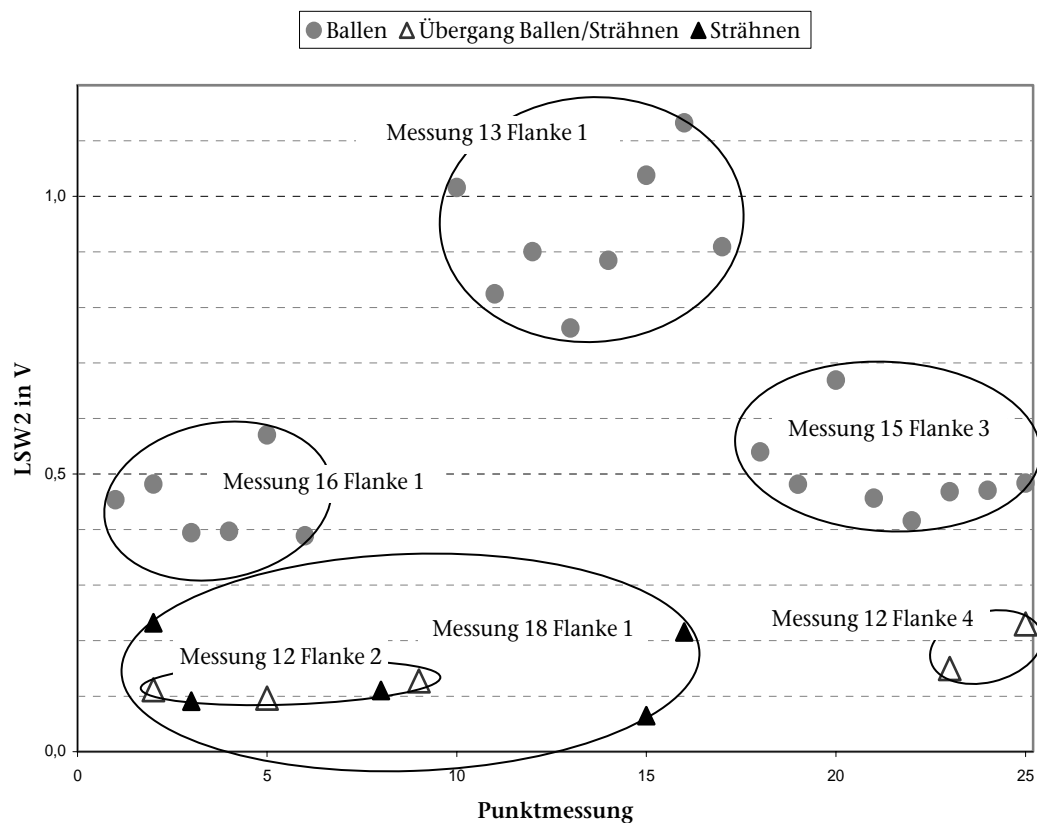


Abbildung 7.1.1-5: Mittelwerte der Punktmessungen von LSW2, vertikal-fallend, Förderstreckenmitte

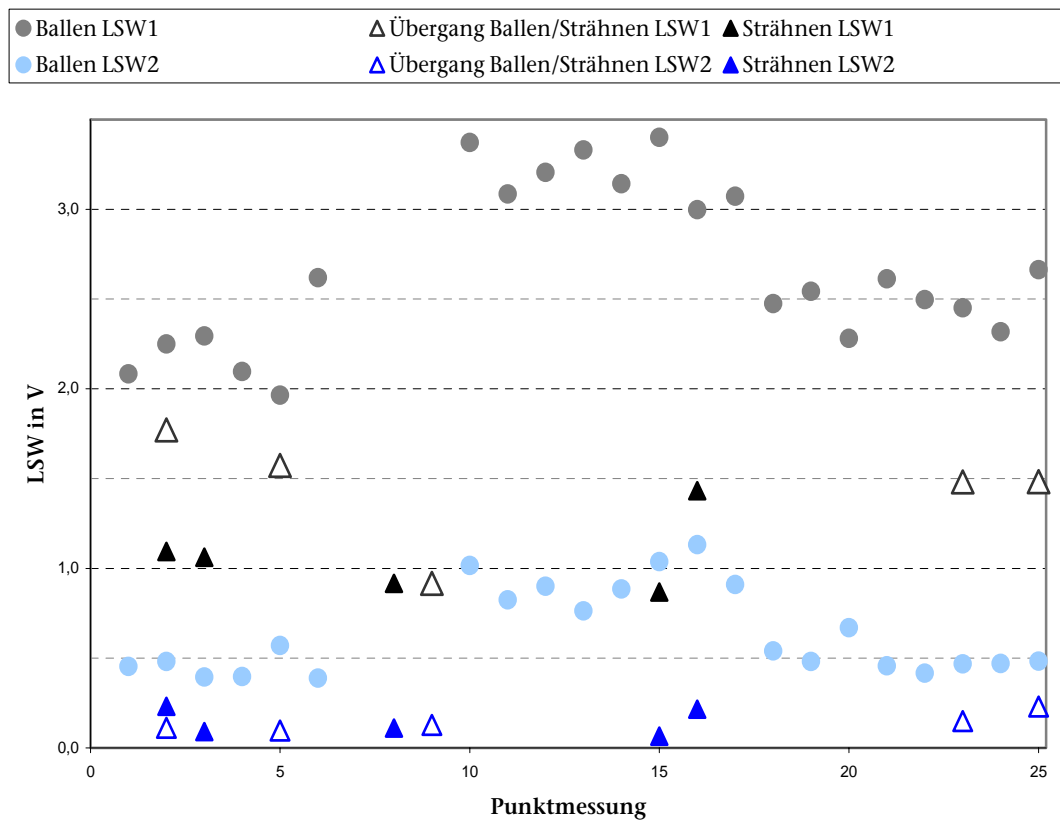


Abbildung 7.1.1-6: Zusammenstellung der Mittelwerte der Punktmessungen von LSW1 und LSW2

Da sich ein sensorischer Aufbau wie für die beiden Licht-Spannungs-Wandler nicht für das Fördergut Kohlenstaub, aufgrund Anhaftungen an der Innenseite der Förderleitung und der damit verbundenen Reduzierung ihrer Transparenz, eignet, wurde Quarzsand als Modells substanz in der Pilotanlage gewählt.

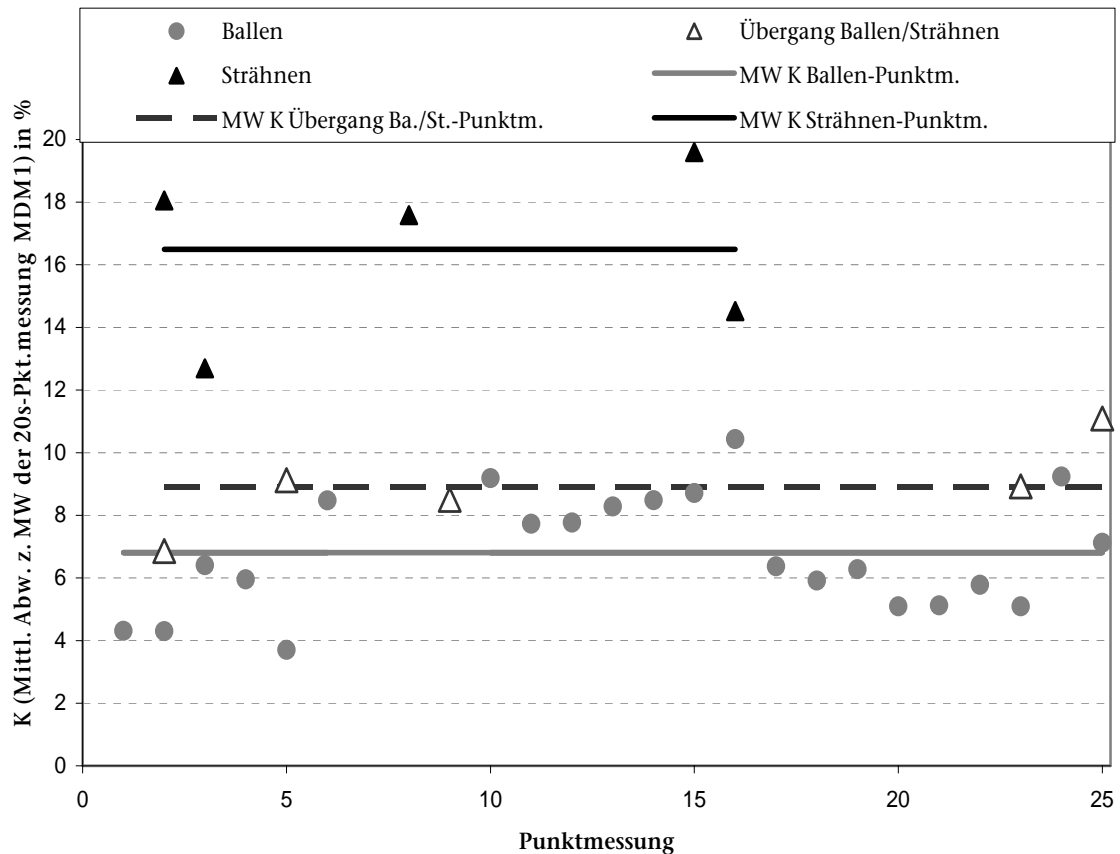


Abbildung 7.1.1-7: Streuung der Messwerte vom Mittelwert der Punktmessung des MDM1

Mit dem MDM3 wurde die kontinuierliche Gaszufuhr vor der Beaufschlagung mit Fördergut erfasst. Aussagen zum Volumenstrom des Fördermediums sind hiermit möglich.

Der MDM1 am Ende der Förderstrecke befände sich beim Vergleich mit der realen Anlage in Blasformnähe. Der Förderstreckenort zur visuellen Bestimmung des Förderzustandes am Bildschirm und der Messort des MDM1 sind dahingehend vergleichbar, dass sie jeweils horizontale Abschnitte sind, die einem vertikal ansteigenden Streckenteil folgen. Darüber hinaus ist bei Strähnenförderung der Volumenstrom des Fördermediums groß genug, so dass sich in horizontalen Streckenteilen wieder Strähnen ausbilden können. Im Folgenden wird über die Betrachtung der Streuung der MDM1-Werte innerhalb einer Punktmessung, siehe Abbildung 7.1.1-7 und Tabelle B-2, nach einer mathematischen Charakterisierung des Förderzustandes gesucht. Diese in Abbildung 7.1.1-7 dargestellten, sich auf jeweils eine Punktmessung beziehenden, prozentualen Streuungen belaufen sich für die Ballenförderung auf 3,7% bis 10,4%, für den Übergangsbereich Ballen- Strähnenförderung auf 6,9% bis 11,1% und für die Strähnenförderung von 12,7% bis 19,6%.

Über die prozentuale Streuung der Messwerte des MDM1 einer Punktmessung ist der Förderzustand der Strähnenförderung eindeutig von den anderen hier betrachteten Förderzuständen abgrenzbar. Bei der Betrachtung einer Punktmessung sind der Übergangsbereich Ballen-/Strähnenförderung und die Ballenförderung noch nicht eindeutig unterscheidbar. Bei gleich bleibender Förderung über einen Zeitraum, der mehrere Punktmessungen beinhaltet, können aus den ermittelten prozentualen Streuungen der Messwerte des MDM1 wiederum

Mittelwerte über mehrere Punktmessungen gebildet werden. Über diese Mittelwerte wird der Förderzustand bestimmbar.

Für die nichtvisuelle Förderzustandsbeschreibung bleiben die Betrachtungen mit DMS1 und DMS4 sowie dem MDM1 in Blasformnähe übrig. Da sich der DMS4 ebenfalls wie der DMS1 im steigenden Teil der Förderleitung befindet, liefert dieser Ergebnisse mit der gleichen Aussagekraft wie beim DMS1. Da für diesen Vergleich der Förderzustand am Lichtschirm visuell ermittelt wurde, wird hier der Schwerpunkt der Betrachtung auf den DMS1 gelegt.

	Minimalwert	Mittelwert+/-Streuung	Maximalwert	Förderzustand
Gutmassenstrom in kg/s	0,030	0,038 +/- 0,005	0,050	Ballen
	0,035	0,045 +/- 0,005	0,049	Übergang Ballen/Strähnen
	0,033	0,042 +/- 0,005	0,047	Strähnen
$\Delta p_i/L$ in Pa/m	9119	10055 +/- 591	11306	Ballen
	5923	7544 +/- 821	8118	Übergang Ballen/Strähnen
	5465	5683 +/- 129	5799	Strähnen
Gasmassenstrom in kg/s	0,00046	0,00070 +/- 0,00020	0,00101	Ballen
	0,00143	0,00145 +/- 0,00005	0,00156	Übergang Ballen/Strähnen
	0,00178	0,00182 +/- 0,00002	0,00183	Strähnen
$v_{0,i}$ in m/s	1,7	2,7 +/- 0,7	3,9	Ballen
	5,7	5,9 +/- 0,3	6,5	Übergang Ballen/Strähnen
	7,5	7,7 +/- 0,1	7,9	Strähnen
Beladung	32	57 +/- 18	101	Ballen
	25	31 +/- 3	33	Übergang Ballen/Strähnen
	18	23 +/- 3	26	Strähnen

*Tabelle 7.1.1-1: Statistische Auswertung über alle FZD-Punktmessungen
der Fördergutmassenstromkategorien 0,03 bis < 0,04 kg/s und 0,04 bis < 0,05 kg/s*

Die Tabellen B-4 und B-5 im Anhang zeigen die Ergebnisse der FZD-Punktmessungen der Fördergutmassenstromkategorien 0,03 bis < 0,04 kg/s und 0,04 bis < 0,05 kg/s (in der Realität strömen 0,22 kg/s durch eine Blasform in den Hochofen), die der in Tabelle 7.1.1-1 dargestellten statistischen Auswertung zugrunde liegen. Die statistischen Berechnungen dieser Tabelle erfolgten jeweils über alle Punktmessungen dieser Auswahl, die denselben Förderzustand aufweisen. Diese FZD-Punktmessungen veranschaulichen somit die Ballenförderung, den Übergangsbereich sowie die Strähnenförderung auf einer Förderzustandskennlinie dieses ausgewählten Fördergutmassenstrombereichs. Dementsprechend gibt Tabelle 7.1.1-1 diese Auswahl des Fördergutmassenstroms wider. Beim statistischen Vergleich wird deutlich, dass bei Ballenförderung die Streuung der Gasmassenströme, die aus den MDM3-Messwerten berechnet wurden, im Gegensatz zur Strähnenförderung aufgrund des instabilen Förderzustandes deutlich erhöht ist. Die Gasdurchflussänderungen werden am Förderstreckenende so schnell, dass das Ansprechverhalten des MDM1 im Vergleich hierzu zu langsam ist, so dass mit dem MDM1 systematisch weniger Gasdurchfluss erfasst wird. Diese erhöhte Streuung bei Ballenförderung im Vergleich mit der Strähnenförderung setzt sich in der Leerrohrgeschwindigkeit und der Beladung fort. Weiterhin ist der dargestellte Beladungsbereich im Förderzustand der Ballenförderung deutlich größer als für die anderen Förderzustände.

Anhand der Parameter $\Delta p_i/L$ und $v_{0,i}$ ist die Abfolge der Förderzustandsbereiche in einem Förderzustandsdiagramm, wie mit Abbildung 2.1.2-1 beschrieben, aus Tabelle 7.1.1-1 ablesbar. Hierbei ist auch ein charakteristisch größerer $\Delta p_i/L$ -Bereich für den Übergangsbereich von Ballen- zu Strähnenförderung in der Streuung der $\Delta p_i/L$ -Werte in Tabelle 7.1.1-1 erkennbar.

7.1.2 Betrachtung der Pulsationen bei verschiedenen Förderzuständen

Im Folgenden werden auftretende Pulsationen des Fördergut- und Fördermedium-Durchflusses bei den Förderzuständen Ballenförderung, Übergang Ballen-/Strähnenförderung und Strähnenförderung behandelt. Basis dieser Betrachtung bildete wiederum die in den Tabellen B-1, B-2, B-3, B-4 und B-5 dargestellte Auswahl von Punktmessungen. Dabei liegen alle Punktmessungen dieser Auswahl innerhalb der Massenstromkategorien $0,03\text{ kg/s}$ bis $<0,04\text{ kg/s}$ und $0,04\text{ kg/s}$ bis $<0,05\text{ kg/s}$ des in Abbildung 7.2.1-2 dargestellten Förderzustandsdiagramms. Aus den ausgewählten Punktmessungen sind die Einzelmesswerte von MDM1, MDM3 und LSW1 in den Abbildungen 7.1.2-1 bis 7.1.2-3 aufgetragen. Zur Betrachtung der Förderzustände Ballenförderung, Übergang Ballen-/Strähnenförderung und Strähnenförderung wird in diesen Abbildungen jeweils eine repräsentative Punktmessung wiedergegeben.

Ausgehend von Abbildung 7.1.2-3 über Abbildung 7.1.2-2 bis zu Abbildung 7.1.2-1 erfolgte jeweils eine Reduzierung der eingesetzten Gasrate, was am Verlauf der MDM3-Werte zu sehen ist. Hierdurch folgen die Punktmessungen dem Kennlinienverlauf der Massenstromkategorien $0,03\text{ kg/s}$ bis $<0,04\text{ kg/s}$ und $0,04\text{ kg/s}$ bis $<0,05\text{ kg/s}$ im Förderzustandsdiagramm in Richtung kleiner werdender Leerrohrgeschwindigkeit.

Der erste Licht-Spannungs-Wandler (LSW1) befindet sich in der aufsteigenden Leitung ca. 1 m nach dem Lichtschirm zu Beginn des Fördersystems. Er detektiert das Vorbeiströmen des Fördergutes. Der Sender emittiert stets eine konstante Lichtmenge im infraroten Bereich. Der Infrarotsensor detektiert die Lichtmenge und wandelt diese in ein Spannungssignal. Dieses Spannungssignal ist 0 V , wenn kein Fördergut den Sensor passiert und bis zu 5 V , wenn, bedingt durch vorbeiströmende Fördergutpartikel, der Empfänger kein Licht mehr vom Sender empfängt. Mit dem LSW1 ist somit eine Differenzierung des Förderzustandes bei gleich bleibendem Fördergutmassenstrom wie im Folgenden beschrieben, möglich. Bei der Betrachtung von 7.1.2-1 über 7.1.2-2 bis zu 7.1.2-3 ist bei gleich bleibendem Fördergutmassenstrom eine Verringerung der Anzahl an „ 5 V -Ausschlägen“ (leere Förderleitung) des LSW1 erkennbar. Somit liegen die Mittelwerte der LSW1-Spannungen einer Punktmessung bei Strähnenförderung deutlich und reproduzierbar niedriger als bei Ballenförderung, siehe auch Abbildung 7.1.1-2 und Tabelle B-1. Mit dem Verlauf des Spannungswertes des Lichtspannungswandlers in Volt ist demnach der jeweilige aktuelle Förderzustand charakterisierbar.

Anhand der blau dargestellten MDM1-Verläufe ist ein Fluktuieren des Volumenstroms in Normlitern pro Minute (NLPM) des Fördermediums durch das Fördergut in Blasformnähe erkennbar. Im ursächlichen Zusammenhang hierzu sind die Ballen und Strähnen zu sehen, die wiederholt ca. alle 5 s (Ballen) bzw. über mindestens 10 s Sekunden (Strähne) den durchströmbaren Leitungsquerschnitt verringern. Bei der Betrachtung der blauen Verläufe des MDM1 ist ausgehend von Abbildung 7.1.2-1 über 7.1.2-2 bis zu Abbildung 7.1.2-3 eine Zunahme der Streuung dieser Messwerte feststellbar. Die Ursache dieser unterschiedlichen Streuungen der Messwerte des MDM1 ist in den verschiedenen Förderzuständen und den damit einhergehenden differierenden Gasraten des Fördermediums zu finden.

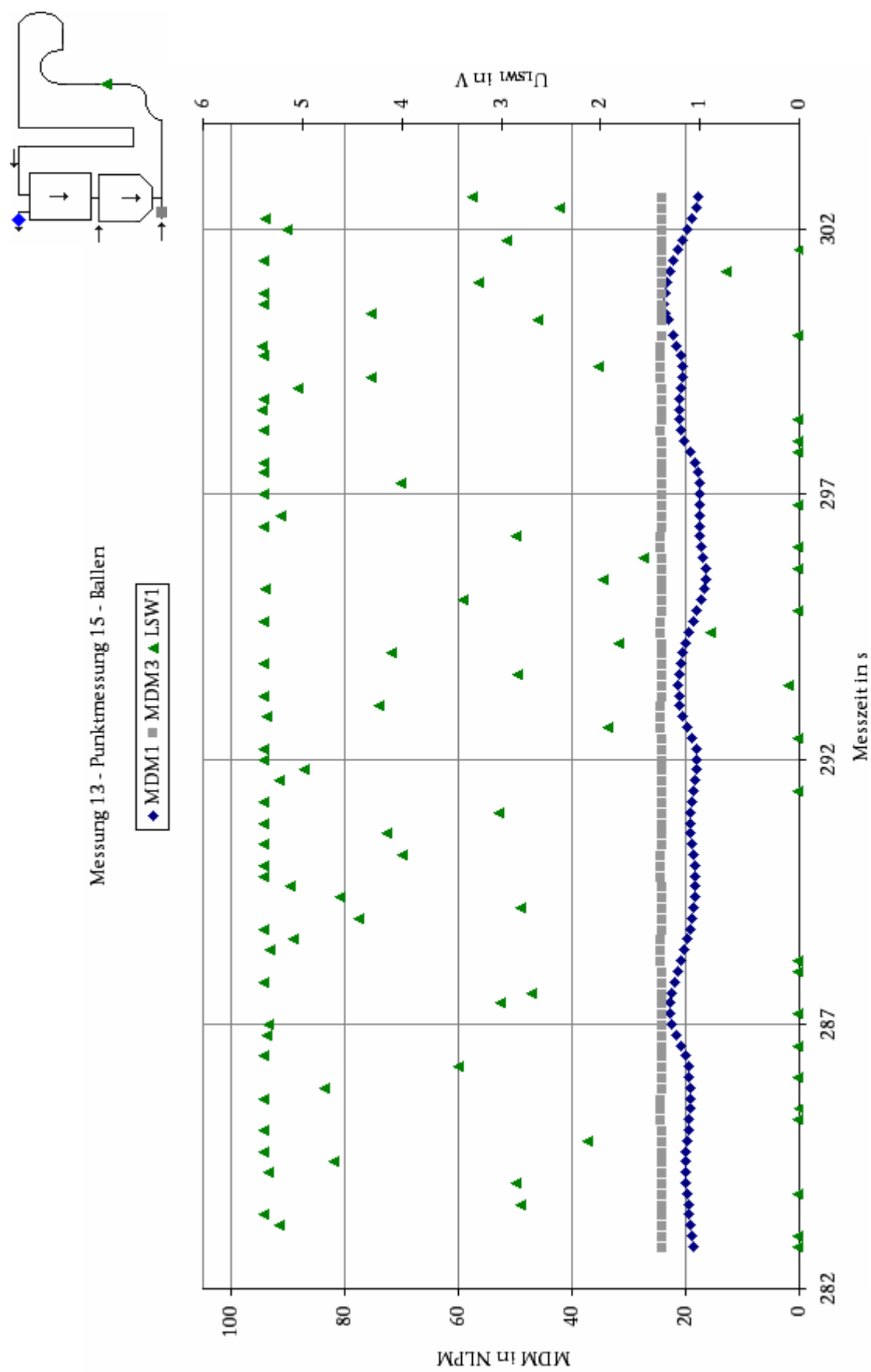


Abbildung 7.1.2-1: Repräsentative Punktmessung während Ballenförderung

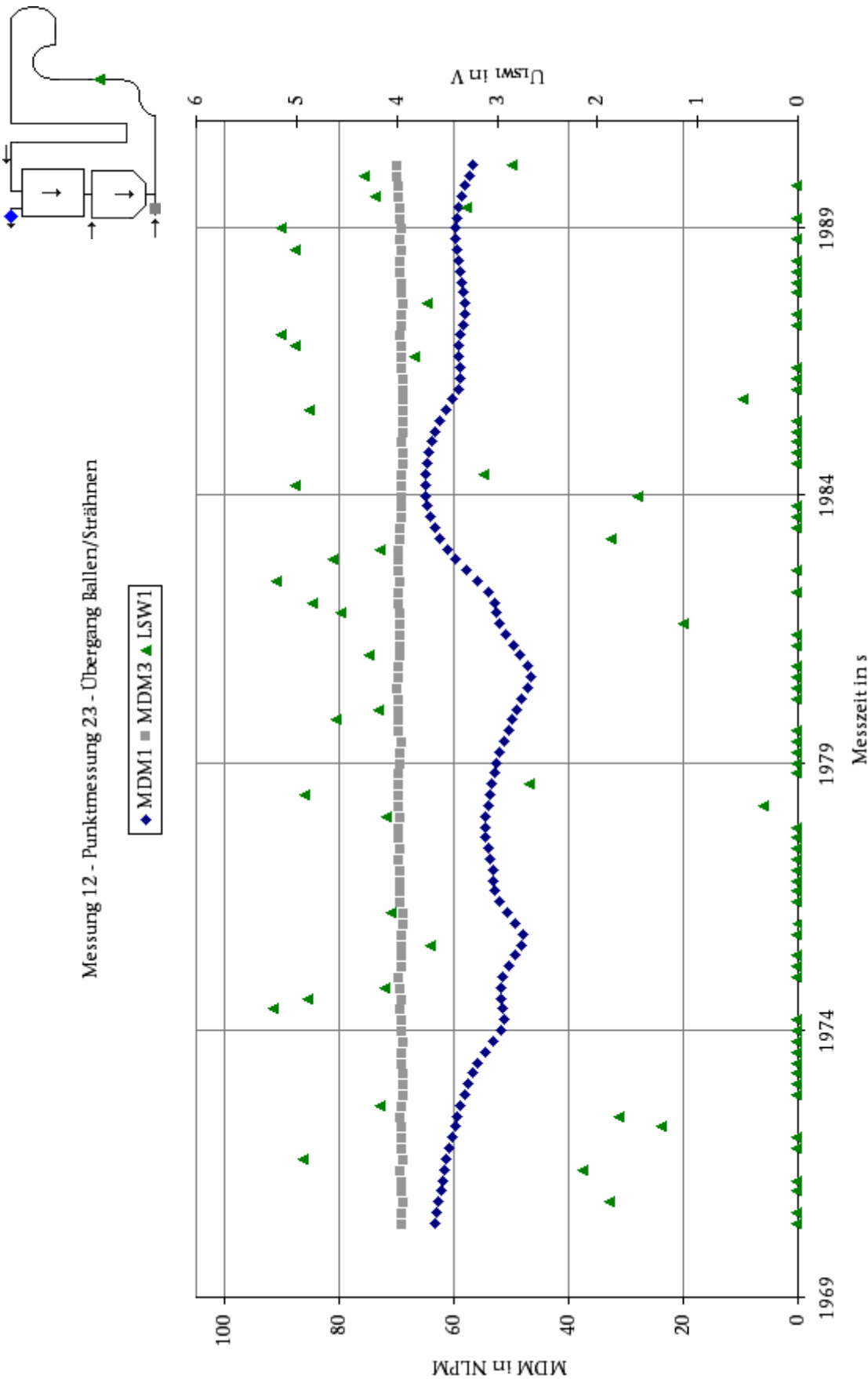


Abbildung 7.1.2-2: Repräsentative Punktmessung während Übergang Ballen-/Strähnenförderung

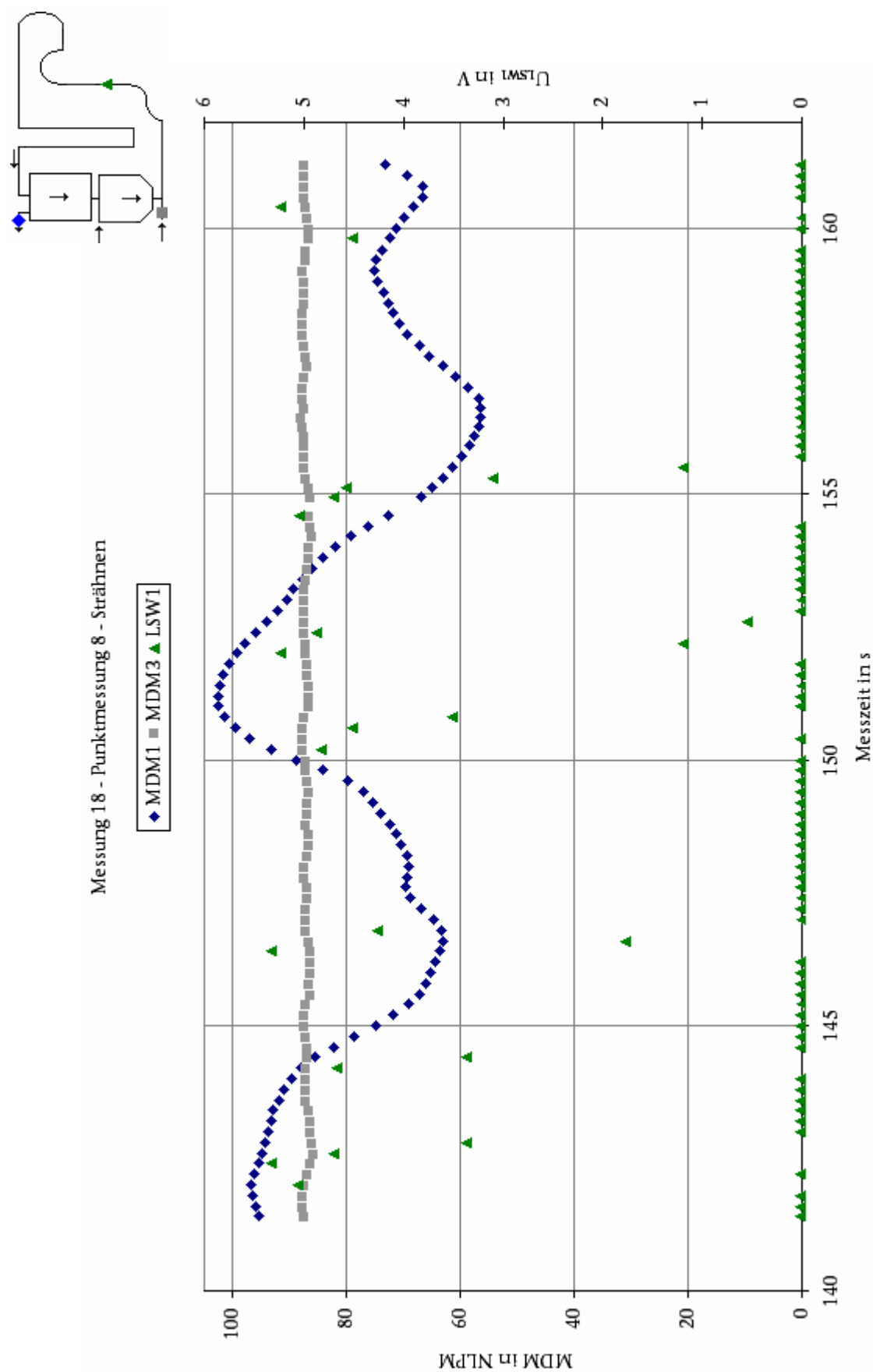


Abbildung 7.1.2-3: Repräsentative Punktmessung während Strähnenförderung

Zur Bestimmung des eigentlichen Volumenstroms einer Punktmessung und der davon abgeleiteten Größen wurden jeweils die Werte des MDM3 zugrunde gelegt. Die MDM3-Werte sind durch die Pufferungswirkung im Fluidisierer geglättet. Die Differenz zwischen den MDM3- und den MDM1-Werten in den Abbildungen 7.1.2-1 bis 7.1.2-4 ist auf einen Tiefpasseffekt zurückführbar, der vom Verhältnis Ansprechzeit des MDM1 zur Zeit zwischen zwei Ballen oder Strähnen abhängt. Zudem wäre eine nicht ganz auszuschließende Leckage am Luftfilter denkbar. Dieser Luftfilter jedoch ist unverzichtbar um den MDM1 vor Staub zu schützen.

Die Bestimmung des Förderzustands der Messung erfolgte visuell am Lichtschirm zu Beginn der Förderstrecke. Der MDM1 ist am Vorratsbehälter in der Nähe des Förderstreckenendes, wie das Prozessschema in Abbildung 4.4-1 zeigt, eingebaut. Im Verlauf der Förderstrecke finden Veränderungen des Förderzustandes wie in 7.1.1 beschrieben statt. Aufgrund dessen (geringerer Druck) befindet sich die Förderung am Messort des MDM1 etwas weiter links auf derselben Förderzustandskennlinie, als die am Lichtschirm visuell bestimmte Förderung. Hier bilden sich bei Ballenförderung am Lichtschirm, aufgrund des vorhergehenden langen, steigenden Förderstreckenabschnittes, durch Zusammenschluss mehrerer kleiner Ballen, am Einlauf des Vorratsbehälters, größere Ballen aus. Bei Strähnenförderung am Lichtschirm tritt am Messort des MDM1 nach dem steigenden Teil der Förderstrecke am Streckenende, die Ausbildung kleiner Ballen auf. Aus dieser Betrachtung heraus ist in Abbildung 7.1.2-3 im blauen Verlauf die größere Schwankung der Messwerte des Fördergasvolumenstroms bei kleineren Ballen erklärbar. In den Abbildungen 7.1.2-2 und 7.1.2-1 ist aufgrund der Ausbildung größerer Ballen eine kleinere Streuung der Fördermedium-Volumenstromwerte zu sehen. Würden sich die Ballen weiter ausbilden, bestünde die Gefahr, die Schwelle zur Stopfgrenze im aufsteigenden Teil der Förderleitung zu überschreiten.

Beim Fördern in den Förderzuständen Ballenförderung, Ballen-/Strähnenförderung und Strähnenförderung treten Messwertschwankungen auf, die in den Abbildungen 7.1.2-1 bis 7.1.2-3 erkennbar sind. Zur mathematischen Untersuchung der Messwertschwankungen im Übergangsbereich der Ballen-/Strähnenförderung in Hinblick auf die Existenz periodischer Anteile fand nachfolgend eine Fast Fourier Transformation (FFT) des in Abbildung 7.1.2-4 dargestellten ausgewählten Messdatenausschnittes statt. Da für diesen Förderzustand eine größere Streuung des Fördergutmassenstroms während aufeinander folgender Punktmessungen charakteristisch ist, beinhaltet die folgende Auswahl auch die beiden Punktmessungen 24 und 26 aus Messung 12, die der Fördergutmassenstromkategorie $0,08\text{ kg/s}$ bis $< 0,09\text{ kg/s}$ angehören.

Die Ergebnisse der FFT in Abbildung 7.1.2-5 wurden mit Matlab berechnet. Die Messdatenaufnahme erfolgte in Labview mit 5 Hz womit die Schrittweite für die FFT zu $0,2$ Sekunden gegeben ist. Die aus der Abtastfrequenz resultierende Grenzfrequenz, bei der das Spektrum gespiegelt wird (Unterabtastung, Shannon) ist $2,5\text{ Hz}$. Das Ergebnis der FFT der ausgewählten MDM1-Daten bei Ballen-/Strähnenförderung zeigte periodische Anteile mit einer Periodendauer von ca. 10 s , die auch in Abbildung 7.1.2-4 zu sehen sind.

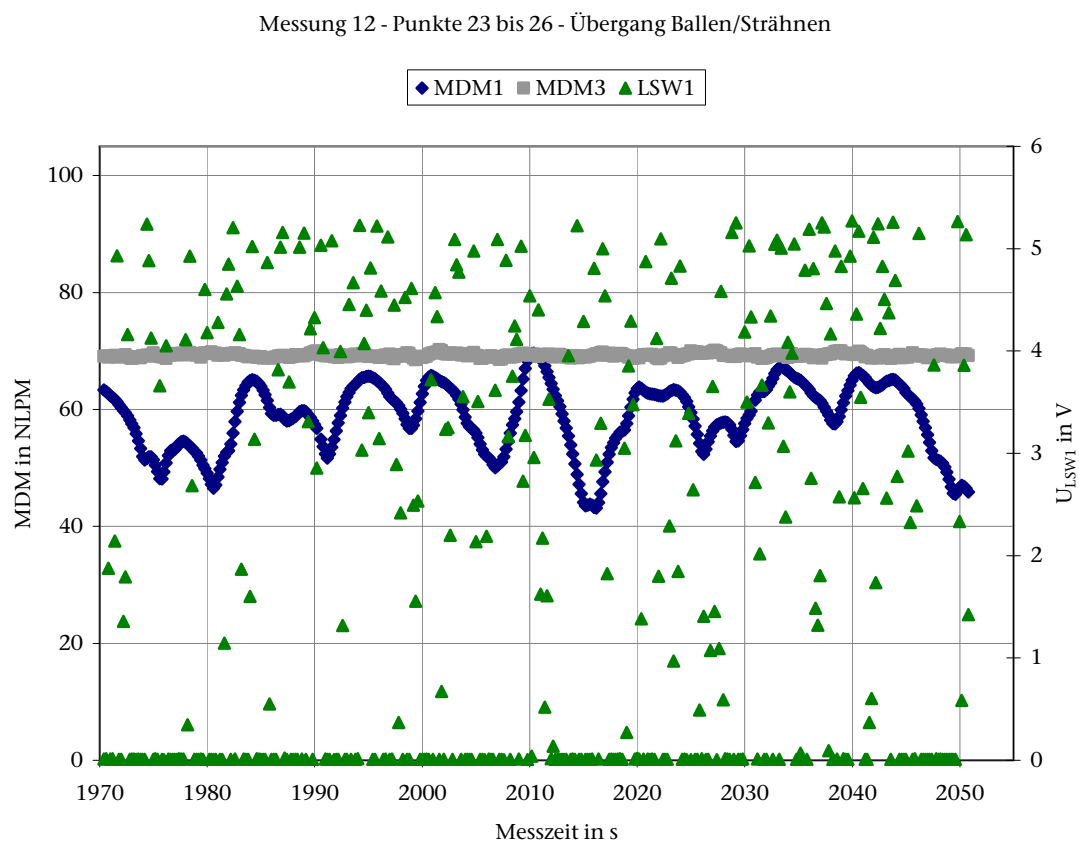


Abbildung 7.1.2-4: Messdatenauswahl zur FFT-Berechnung bei Ballen-/Strähnenförderung

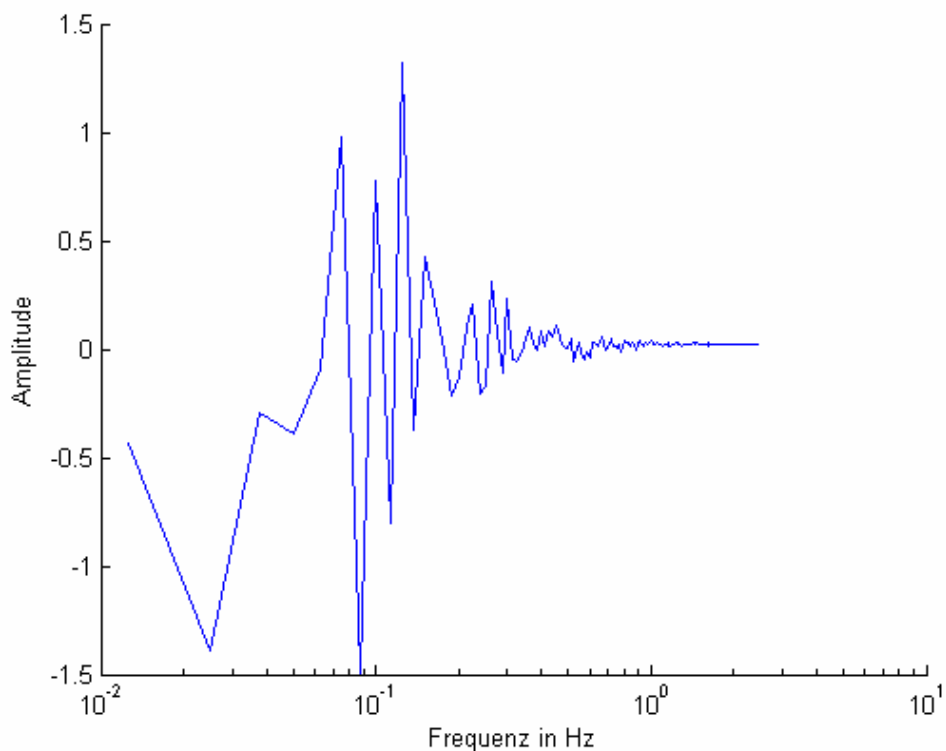


Abbildung 7.1.2-5: FFT-Ergebnis der MDM1-Daten bei Ballen-/Strähnenförderung während Messung 12 Punktmessung 23 bis 26

7.2 Betrachtungen zum Förderzustandsdiagramm

Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, dient das Förderzustandsdiagramm der vergleichbaren Darstellung der Zustände der pneumatischen Förderung. Die Berechnung der abgeleiteten Größen $\Delta p/L$, v_0 und $\dot{m}_{\text{Fördergut}}$ bzw. μ , welche das Förderzustandsdiagramm jeweils aufspannen, ist in Kapitel 6.2 erläutert.

Die auf der X-Achse aufgetragene Leerrohrgeschwindigkeit v_0 und die auf der Y-Achse aufgetragene normierte Druckdifferenz $\Delta p/L$ werden durch den Parameter Massenstrom des Fördergutes $\dot{m}_{\text{Fördergut}}$ ergänzt. In den Darstellungen wurde neben dem Massenstrom des Fördergutes auch die Beladung μ als Kennlinienparameter gewählt.

7.2.1 Experimentell erstellte Förderzustandsdiagramme

Im Folgenden dient der in den Abbildungen 7.2.1-1 und 7.2.1-2 dargestellte Ausschnitt aus dem Förderzustandsdiagramm zur Veranschaulichung der Ergebnisse aus den Versuchen der Dichtstrom- und Strähnenförderung, siehe Tabellen B-6, B-7, B-8 und B-9. Der Diagrammausschnitt beinhaltet die Ergebnisse einzelner Punktmessungen über jeweils 100 Datensätze aus Messwerten, die mit 5Hz über 20s erfasst worden sind. Die Anlage zur pneumatischen Förderung wurde vor diesen Messungen durch einen Injektor mit größerem Leitungsquerschnitt hinsichtlich seiner Strömungseigenschaften in Richtung Dichtstrom optimiert. Somit ist aus dem Bereich der Dünnstromförderung wiederum lediglich die Strähnenförderung noch in der Anlage möglich und somit mess- und darstellbar. Dieselben Punktmessungen liegen sowohl der Abbildung 7.2.1-1 und der Abbildung 7.2.1-2 zugrunde. Für das zweidimensionale Förderzustandsdiagramm wird in Abbildung 7.2.1-1 die Beladung μ und in Abbildung 7.2.1-2 der Massenstrom des Fördergutes $\dot{m}_{\text{Fördergut}}$ als Kennlinienparameter in Kategorien diskretisiert dargestellt, wodurch jeweils eine Druckkennlinienschar entsteht.

Wie den Legenden der Abbildungen 7.2.1-1 und 7.2.1-2 entnehmbar ist, werden die verschiedenen Beladungs- bzw. Fördergutmassenstromkategorien durch unterschiedliche Farben veranschaulicht. Die verwendeten Symbole ordnen den eingezeichneten Messpunkten den, während ihrer Messung jeweils am Lichtschirm beobachteten Förderzustand zu. Punkte gleicher Kategorie, also Farbe, jedoch mit unterschiedlichem Förderzustand ergeben jeweils eine Druckkennlinie, deren Verlauf über die entsprechenden Förderzustandsbereiche in der Farbe der Kategorie nachgezeichnet ist. Die einzelnen Druckkennlinien durchlaufen dabei jeweils die Förderzustände Ballenförderung, den Übergangsbereich Ballen-/Strähnenförderung und die Strähnenförderung.

Der Förderzustand der Ballenförderung liegt in den Förderzustandsdiagrammen im Bereich von $v_0 = 1,7\text{m/s}$ bis $4,0\text{m/s}$ und $\Delta p/L = 0,11\text{bar/m}$ bis $0,09\text{bar/m}$. Hieran schließt sich der Übergangsbereich zwischen Ballen- und Strähnenförderung bei $v_0 = 4,2\text{m/s}$ bis $6,5\text{m/s}$ und $\Delta p/L = 0,10\text{bar/m}$ bis $0,059\text{bar/m}$ an. Bei $v_0 = 7,5\text{m/s}$ bis $8,0\text{m/s}$ und $\Delta p/L = 0,059\text{bar/m}$ bis $0,055\text{bar/m}$ ist die Strähnenförderung wiederzufinden. [Boh83], [Mus69] und [Mus74] geben bezogen auf DN100 für den Bereich der Ballenförderung Luftgeschwindigkeiten von $v_{\text{Luft}} = 2\text{m/s}$ bis 10m/s bei $\Delta p/100\text{m} = 1\text{bar}/100\text{m}$ bis $2,5\text{bar}/100\text{m}$ und einer Beladung von $\mu = 30$ bis 100 an. Der Bereich der Strähnenförderung liegt für sie bezogen auf DN100 bei $v_{\text{Luft}} = 10\text{m/s}$ bis 30m/s , einem $\Delta p/100\text{m} = 1\text{bar}/100\text{m}$ bis

2,5bar/100m und $\mu = 5$ bis 50. Die Flugförderung beginnt für sie bei den maximalen Werten $v_{Luft} = 20\text{ m/s}$, $\Delta p/100\text{ m} = 1\text{ bar}/100\text{ m}$ und $\mu = 10$ für DN100.

Zur Verwendung der Literaturangaben zur Luftgeschwindigkeit für einen Vergleich mit der in dieser Arbeit betrachteten Leerrohrgeschwindigkeit muss beachtet werden, dass für die Luftgeschwindigkeit im Gegensatz zur Leerrohrgeschwindigkeit die gutfördernde Förderstrecke betrachtet wird. Hierdurch liegen die für die Förderzustände angegebenen Luftgeschwindigkeiten systematisch geringfügig oberhalb der in den hier vorgelegten Versuchen erzielten Leerrohrgeschwindigkeiten.

Ab 1,5bar war ein sicheres und reproduzierbares Fördern mit der Pilotanlage durchführbar. Bezogen auf die Förderstreckenlänge von 20m und dem Förderleitungsinwenddurchmesser von 13mm wurde der Förderstreckenansfangsdruck zwischen 1,5bar, 2,0bar und 2,5bar variiert. Die hiermit erreichbaren Ergebnisse für den auf die Förderstreckenlänge bezogenen Druckabfall während der Ballen- und Strähnenförderung sind im Vergleich mit den Literaturwerten, die für 100m Förderstrecke und auf DN100 bezogen angegeben sind, um den Faktor 5 größer. Bei ähnlichen Förderbedingungen und größeren Rohrdurchmessern zeigen sich demnach geringere Druckabfälle wie auch [Mey03] feststellte.

Der Vergleich der experimentell ermittelten Beladungen mit den Literaturangaben ergibt eine Übereinstimmung für den gemessenen Ausschnitt aus dem Bereich der Strähnenförderung. Im Gegensatz zu den Literaturwerten förderte die Pilotanlage jedoch Ballen bereits ab Beladungen $\mu \geq 19$ in den durchgeführten Versuchen. Allerdings gibt auch [VDI02] an, dass sich bereits bei Beladungen von $\mu > 10$ und kleinerer Geschwindigkeit Strähnen und Ballen bei gleichzeitig leicht ansteigendem Druckverlust bilden. Hierbei betrachtet [VDI02] ein System mit einem Förderleitungsinwenddurchmesser von 150mm, in dem mit Luft als Fördermedium bei 1,5bar rieselfähige Schüttgüter mit Korngrößen $> 10\mu\text{m}$ gefördert wurden. Das dazugehörige Förderzustandsdiagramm ist in Abbildung 7.2.1-3 dargestellt.

Die Druckkennlinien geringerer Beladung und kleinerem Fördergutmassenstroms befinden sich in den Förderzustandsdiagrammen der Abbildungen 7.2.1-1, 7.2.1-2 und 7.2.1-3 charakteristisch im unteren Bereich der Kennlinienschar. Bei der Betrachtung des Verlaufs der einzelnen Druckkennlinien der Abbildungen 7.2.1-1, 7.2.1-2 und 7.2.1-3 ist ein flacher, leicht fallender Verlauf mit zunehmendem v_0 im Bereich der Ballenförderung für ähnliche Förderraten feststellbar. Im Übergangsbereich der Strähnen-/Ballenförderung dieser Förderzustandsdiagramme fallen die Druckkennlinien mit steigendem v_0 stark ab, bevor sie im Förderzustand der ausgeprägten Strähnenförderung mit zunehmendem v_0 allmählich wieder ansteigen. Der direkte Vergleich zeigt, dass sich die in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse zum Förderzustandsdiagramm aus Abbildung 7.2.1-2 in Abbildung 7.2.1-3 zwischen der Druckkennlinie für einen Gutmassenstrom von 1 t/h und den Grenzen für 0 t/h einordnen lassen. Während der durchgeführten Versuche wurden Massenströme von $0,036\text{ t/h}$ bis $0,360\text{ t/h}$ im Bereich der Ballen- bis Strähnenförderung erreicht.

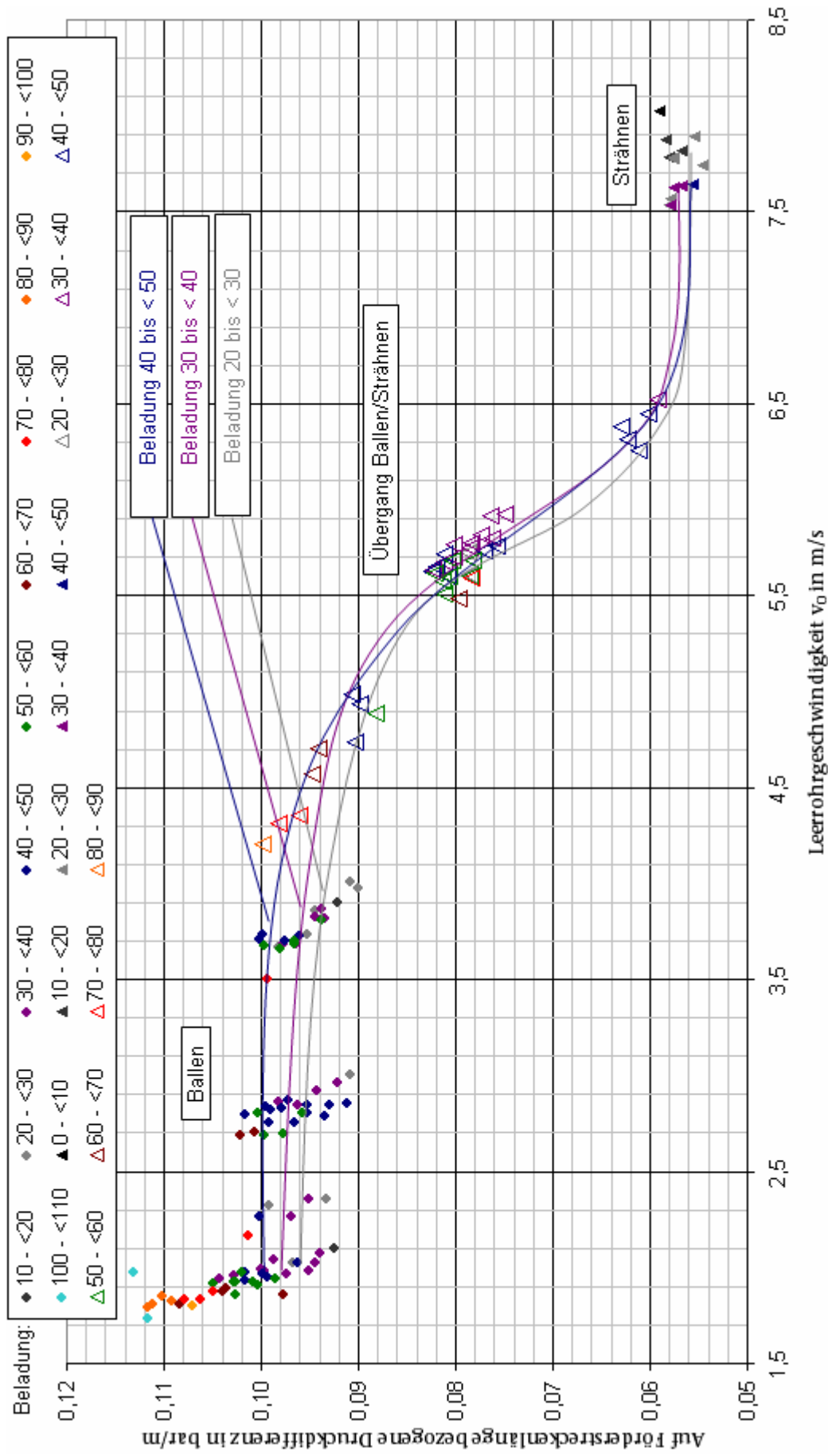


Abbildung 7.2.1-1: Förderzustandsdiagramm mit mittlerer Leerrohrgeschwindigkeit und Beladung als Kennlinienparameter

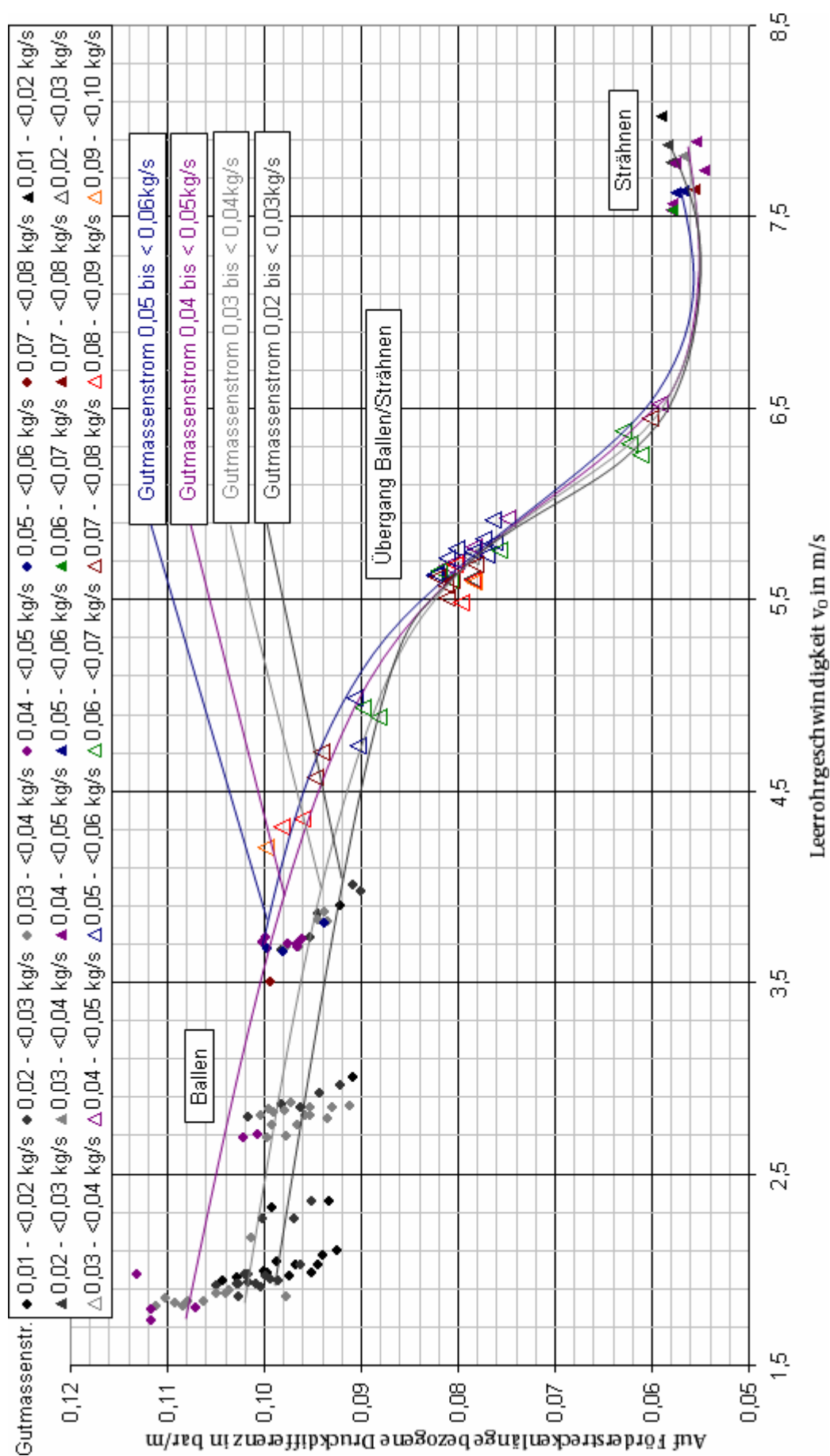


Abbildung 7.2.1-2: Förderzustandsdiagramm mit mittlerer Leerrohrgeschwindigkeit und Fördergutmassenstrom als Kennlinienparameter

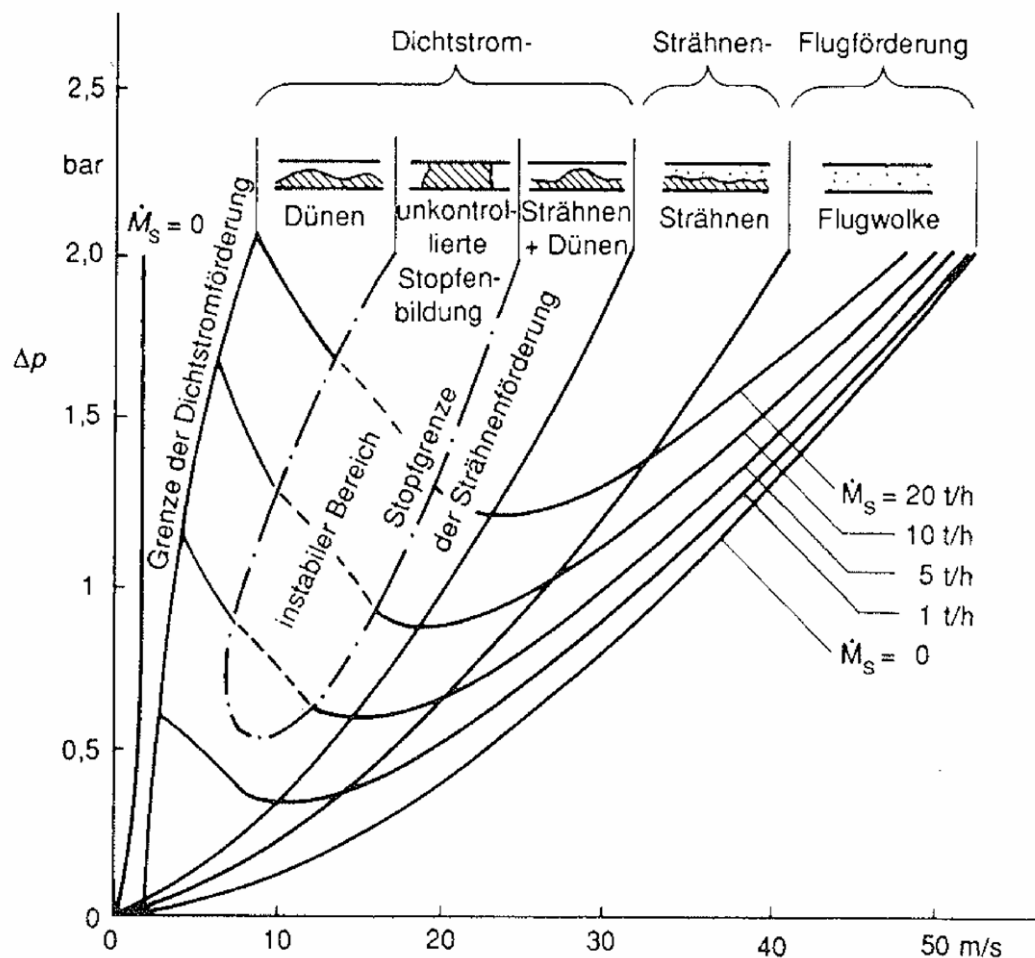


Abbildung 7.2.1-3: FZD für rieselfähige Schüttgüter mit Korngrößen $>10 \mu\text{m}$, 150 mm Leitungsquerschnitt und Fördermedium Luft aus [VDI02] mit Fördergutmassenstrom als Parameter

[Mey03] berechnet den realen Fördergutmassenstrom der eingesetzten Kohle zu 820 kg/h bzw. $0,23 \text{ kg/s}$ bei einem Anlageneingangsdruck von 4 bar am Beispiel einer von 48 Einblasleitungen des Hochofens der Dillinger Hütte unter Verwendung eines mittleren Leitungsinnendurchmessers von $28,5 \text{ mm}$. Die in der hier vorliegenden Arbeit ermittelten Druckkennlinien beziehen sich auf Fördergutmassenströme des verwendeten Quarzsandes als Modellsubstanz von $0,02 \text{ kg/s}$ bis $0,06 \text{ kg/s}$ bei einem Leitungsinnendurchmesser von 13 mm und einem Anlageneingangsdruck von $1,09 \text{ bar}$ bis $2,26 \text{ bar}$. Real liegt der am Hochofen der Dillinger Hütte genutzte Förderbereich im Strähnenbereich. Der in dieser Arbeit betrachtete Förderbereich und die daraus resultierenden Messergebnisse zeigen im Gegensatz hierzu den Übergangs- oder Dichtstrombereich.

In Abbildung 7.2.1-3 aus [VDI02] ist während der Dichtstromförderung ein instabiler Bereich, der durch unkontrollierte Stopfenbildung gekennzeichnet ist, dargestellt. Dieser instabile Bereich ist in den Versuchsergebnissen in den Abbildungen 7.2.1-1 und 7.2.1-2 als Ballenförderung und dem Übergang Ballen-/Strähnenförderung wiederzufinden und durch größere Gasmassenstromänderungen gekennzeichnet. Im Übergangsbereich Ballen-/Strähnenförderung prägen sich ebenfalls größere Gutmassenstromänderungen aus, so dass nicht mehrere aufeinander folgende Punktmessungen dieses Förderzustandes derselben Gutmassenstromkategorie angehören wie in Kapitel 7.1.2 beschrieben, siehe Tabelle B-3.

Die Pilotanlage beinhaltet in ihrer Förderstreckenführung u. a. steigende und fallende Leitungsabschnitte. Aufgrund dieser Streckenführung entstehen Bereiche mit unterschiedlichen und somit auch instabilen Förderzuständen. Bei Betrachtung des Fördergasmassenstroms über die gesamte Förderstreckenlänge ist im Vergleich von Förderleitungsbereichen mit Ballenförderung zu solchen mit vorherrschender Strähnenförderung die Konstanz des Fördergasmassenstroms nur eingeschränkt gegeben, so dass eine Abweichung der realen Ergebnisse der Leerrohrgeschwindigkeit von der Theorie streckenführungsbedingt zu erwarten ist. In einer realen pneumatischen Förderanlage wird sich stets das Fördergutprofil der Ballenförderung in vertikalsteigenden Streckenabschnitten ausprägen. Einzige Ausnahme ist die reine Dünnstromförderung.

Aktuell ist an der Pilotanlage am Eingang des Vorratsbehälters die Streckenführung vertikalsteigend mit Ausbildung von Ballenförderung. Im Vergleich mit der Streckenführung am Hochofen entspräche dies dem Streckenteil unmittelbar vor der Blasform. Bei Einsatz eines vertikal-fallenden Streckenabschnittes an dieser Stelle, kommt es zur Fragmentierung der Ballen und damit zur Ausbildung des stabilen Förderzustandes der Strähnenförderung. Hier liegt ein technisches Optimierungspotential, auf das in der Abschlussdiskussion näher eingegangen wird.

Im Weiteren wird der Massenstrom des Fördergutes der Beladung aufgrund der besseren praktischen Verwendbarkeit als Kennlinienparameter vorgezogen. Deshalb wird für die folgende funktionelle Beschreibung von Abschnitten des Förderzustandsdiagramms mit einem theoretischen Modell auf Basis der gewonnenen Versuchsergebnisse ebenfalls der Fördergutmassenstrom als Kennlinienparameter gewählt.

7.2.2 Gegenüberstellung von Experiment und mathematischem Modell im Förderzustandsdiagramm

Zum Vergleich von experimentell erhaltenen Förderzustandsdiagrammpunkten mit Ergebnissen des mathematischen Modells dienen die theoretischen Grundlagen aus Kapitel 3 und der in Kapitel 6.3 beschriebene Berechnungsweg. Für die Durchführung einer Modellrechnung gemäß Kapitel 6.3 werden jeweils 5 Punktmessungen, die in ihrer Fördergutmassenstromkategorie und in ihrem Förderzustand übereinstimmen verwendet. Die Modellrechnung besitzt für den Bereich der Strähnen- bis Ballenförderung Gültigkeit. Für die im Folgenden beschriebene Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Experiment und mathematischem Modell wurde der Übergangsbereich Ballen-/Strähnenförderung gewählt. Den Tabellen B-10 und B-11 ist die Auswahl der zugrunde liegenden Punktmessungen zu entnehmen.

Die den Übergangsbereich der Ballen-/Strähnenförderung beschreibenden Ergebnisse der durchgeführten Modellrechnungen sind als farbige Kreuze in Abbildung 7.2.2-1 zu erkennen. Hierbei entspricht die Farbe der Kreuze der Farbe der zugehörigen Massenstromkategorie. In Abbildung 7.2.2-1 sind die resultierenden Modellergebnisse zusammen mit den ihnen zugrunde liegenden experimentell ermittelten Ergebnissen der Punktmessungen einander gegenübergestellt.

Während der Trendbestimmung innerhalb der Modellrechnung wurde wie erwähnt deutlich, dass anstelle des Exponenten f aus $y = \mu^{1+b+f}$ die beiden Unbekannten m und f aus $y = m \cdot \mu^{1+b+f}$ notwendig sind. In Tabelle 7.2.2-1 sind die m - und f -Werte der gemäß der Modellrechnung jeweils ermittelten Druckverlustgleichungen zusammengefasst. In die Druckverlustgleichung (3.1) geht hierbei jeweils der m -Wert als Faktor vor der Beladung und der f -Wert als Exponent der Beladung mit ein.

Messung	Flanke	Punkt	Modellrechn.	Gutmassenstrom in kg/s	Ergebnisse			
					m-Wert	f-Wert	$\Delta p/L$ in (N/m ²)/m	Abw. in %
12	3	17	5	0,0863	1,6352	-1,082	7927	-0,41
17	4	22	5	0,0852			9574	-0,37
17	4	21	5	0,0849			9870	0,51
12	4	26	5	0,0825			8052	0,28
12	4	24	5	0,0808			7865	0,06
17	4	24	4	0,0741	1,677	-1,091	9409	-0,02
17	4	23	4	0,0738			9456	-0,15
12	2	7	4	0,0726			7833	0,17
19	1	4	4	0,0724			5997	-0,39
12	4	27	4	0,0718			8156	0,32
12	3	20	3	0,0687	1,6563	-1,091	8034	-0,57
12	3	13	3	0,0638			7568	-0,16
17	1	5	3	0,0620			9034	0,61
19	1	2	3	0,0620			6294	0,06
19	1	1	3	0,0602			6230	0,00
12	4	30	2	0,0587	1,5969	-1,085	8227	-0,16
12	3	14	2	0,0562			7677	-0,30
17	1	4	2	0,0561			9079	0,22
12	2	3	2	0,0542			7664	0,32
17	1	3	2	0,0536			9031	0,01
19	1	5	1	0,0491	1,6635	-1,101	5869	-0,87
12	2	5	1	0,0477			7840	0,00
12	2	9	1	0,0471			8132	0,15
12	2	2	1	0,0456			7505	0,07
12	4	25	1	0,0442			8057	0,58

Tabelle 7.2.2-1: Ergebnisse der Modellrechnungen

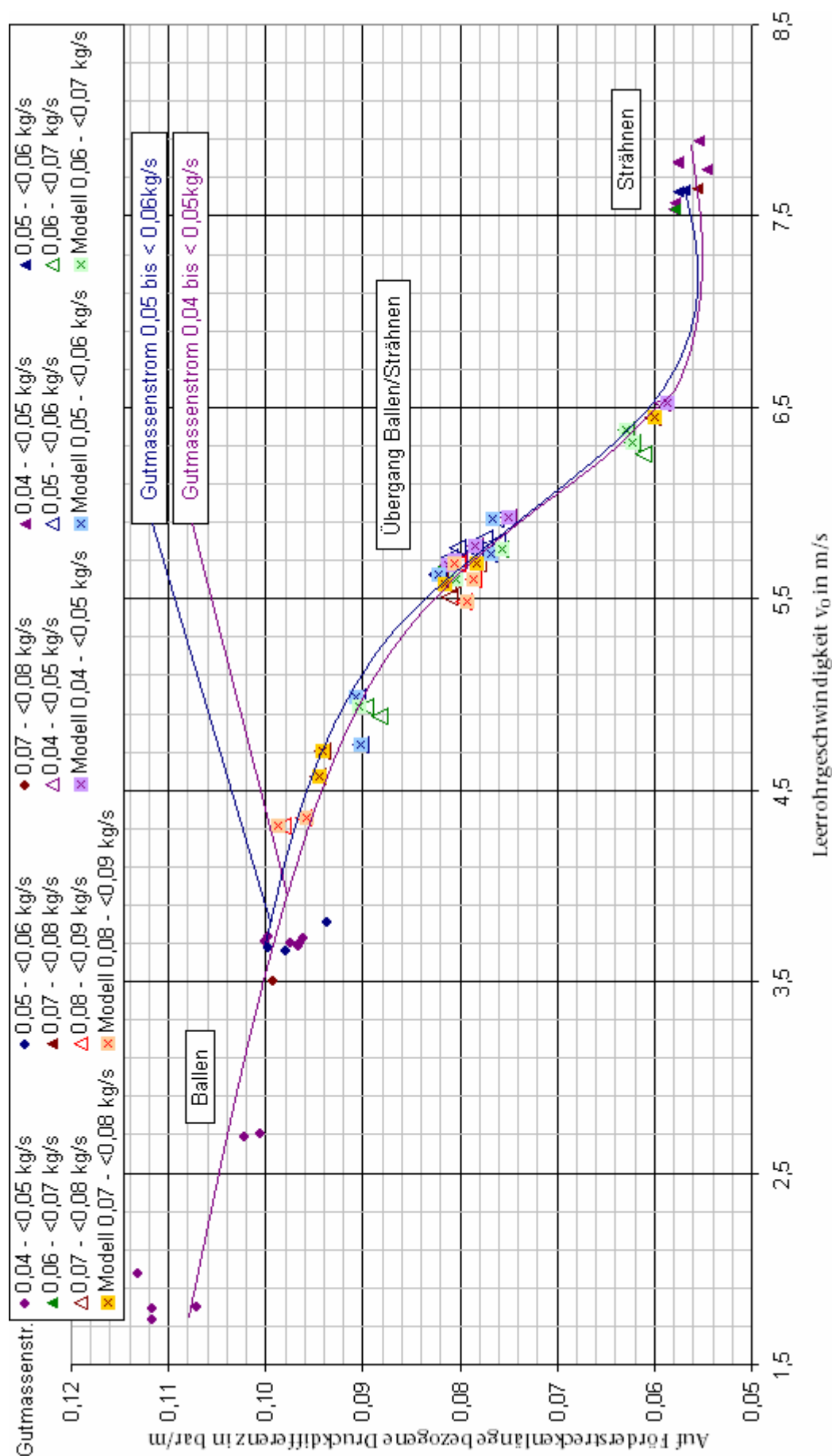


Abbildung 7.2.2-1: Förderzustandsdiagramm mit Ergebnissen aus Experiment und Modellrechnung - Fördergutmassenstrom als Kennlinienparameter

7.3 Förderleitungsverschleiß an 90° Cu-Krümmern

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Messungen zum Förderleitungsverschleiß dargestellt und diskutiert. Hierfür wurden 90° Cu-Krümmern Verschleißversuchen im Bereich der Ballenförderung unterzogen.

Hierbei fasst gemäß Kapitel 6.4.1 Tabelle 7.3-1 die Wägeergebnisse der Cu-Rohre 15 bis 18 vor und nach den jeweils vierstündigen Verschleißversuchen zusammen.

	Startgewicht in g	Endgewicht in g	Gewichtsabnahme in g	Gewichtsabnahme in %
Rohr 15	89,56485	89,48743	0,07742	0,08644
Rohr 16	89,48942	89,42672	0,06270	0,07006
Rohr 17	89,17345	89,08717	0,08628	0,09676
Rohr 18	89,53393	89,36272	0,17121	0,19122

Tabelle 7.3-1: Übersicht der Wägeergebnisse der Cu-Rohre 15, 16, 17 und 18

Abbildung 7.3-1 veranschaulicht exemplarisch am Rohr 16 der Messung 7 den Verlauf des in Kapitel 6.4.2 beschriebenen, auf die Fördergutmasse normierten, punktuellen Cu-Rohr-Wanddickenverschleißes in mm/kg über die näher betrachteten Rohraussenwandstrecken des Einlauf- und Auslaufkrümmers des Cu-Rohres in Förderstreckenrichtung.

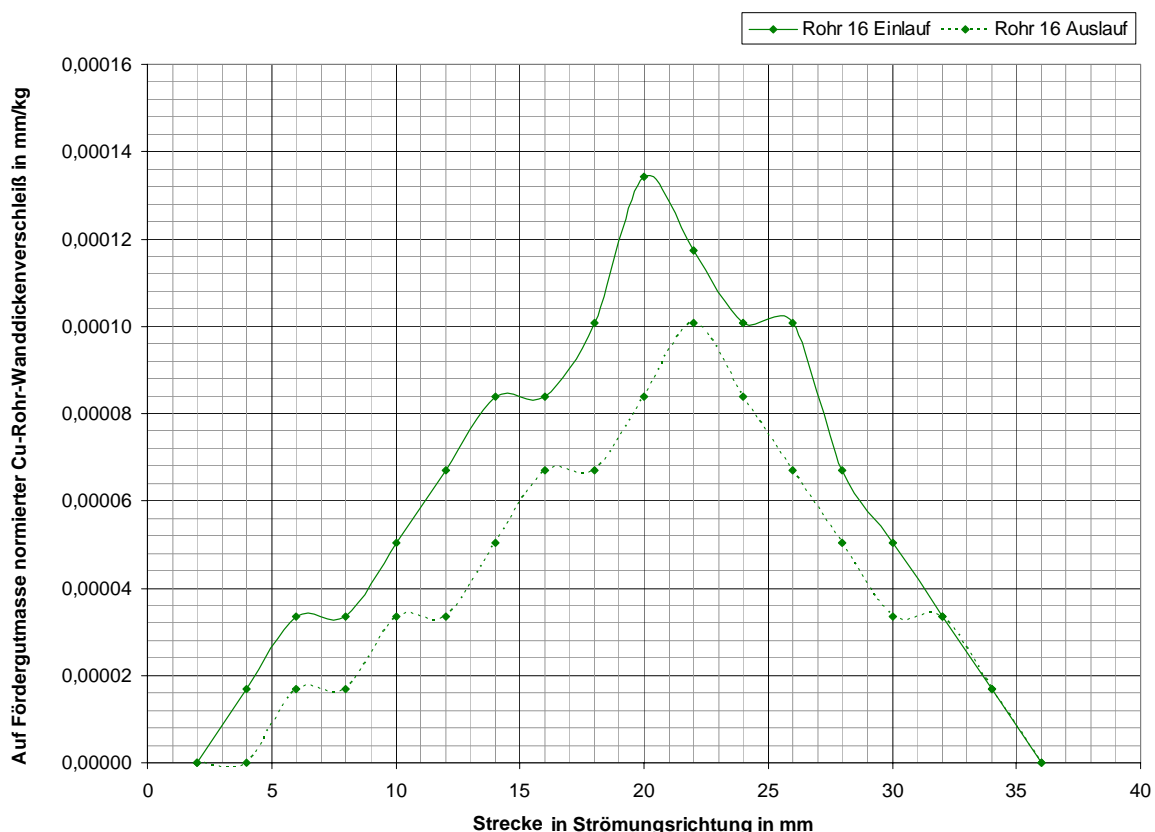


Abbildung 7.3-1: Gegenüberstellung des Cu-Rohr-Wanddickenverschleißes des Einlauf- und Auslaufkrümmers

Das Diagramm zeigt anschaulich, dass der Einlaufkrümmer einem höheren Verschleiß als der Auslaufkrümmer unterliegt. Der höchste Verschleiß liegt beim Einlaufkrümmer mit

$1,3 \cdot 10^{-4} \text{ mm/kg}$ bei 20 mm der Krümmerrausenwandlänge in Förderrichtung und beim Auslaufkrümmer mit $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ mm/kg}$ bei 22 mm . Exemplarisch zeigen die roten Pfeile in Abbildung 6.4-1 diese Orte des höchsten Verschleißes. Die stufige Ausprägung der Kurven im Diagramm beruht auf Messungenauigkeiten bei der Wanddickenmessung und Inhomogenitäten im Material.

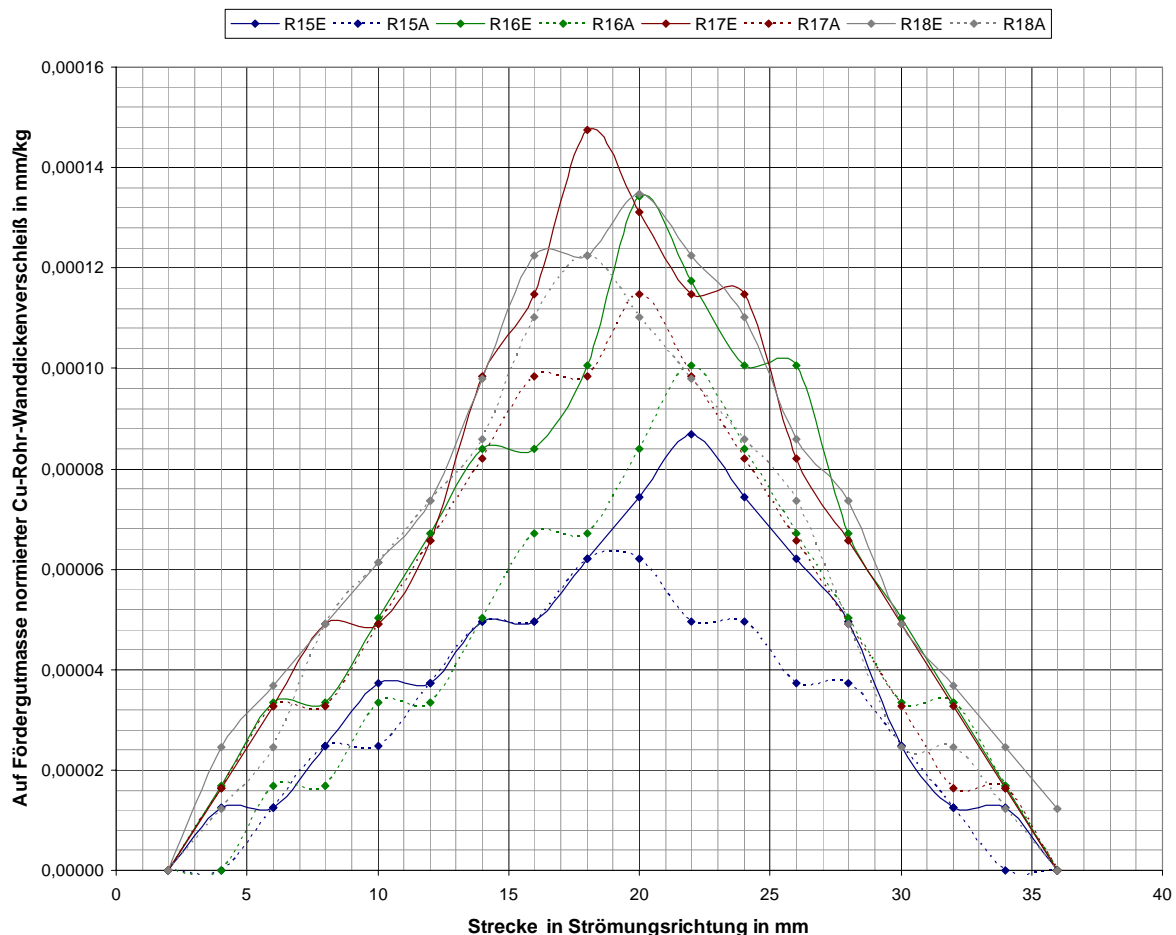


Abbildung 7.3-2: Gegenüberstellung des Cu-Rohr-Wanddickenverschleißes der Einlauf- und Auslaufkrümmer der Rohre 15, 16, 17 und 18

In der Abbildung 7.3-2 sind die Verschleißkurven der Rohre 15, 16, 17 und 18 exemplarisch dargestellt. Auch hier stellen die durchgezogenen Linien die Verschleißverläufe der Einlaufkrümmer und die unterbrochenen Linien die der Auslaufkrümmer dar. Charakteristisch für alle betrachteten Cu-Rohre ist der deutlich geringere Verschleiß der Auslaufkrümmer im Gegensatz zu den Einlaufkrümmern. Dieser Verschleiß der Auslaufkrümmer liegt für die Cu-Rohre zwischen 73% und 91% der Ergebnisse der zugehörigen Einlaufkrümmer. In den Einlaufkrümmern wurde bereits ein Teil der Bewegungsenergie an die Rohrwand abgegeben bzw. für den Verschleiß verwendet. Die in den Auslaufkrümmern zur Verfügung stehende verbliebene Bewegungsenergie der Partikel erzielt hier ebenfalls einen Verschleiß, der jedoch im Vergleich zu den Einlaufkrümmern geringer ausfällt. Bei vergleichender Betrachtung aller Einlaufkrümmer fällt auf, dass das Verschleißmaximum des Versuches mit Cu-Rohr 15 lediglich ca. 60% der Verschleißmaxima der anderen Versuche aus dem Bereich der Ballenförderung erreicht. Ein ähnlicher Vergleich der Auslaufkrümmer ergibt, dass das Verschleißmaximum dieses Versuches auch hier nur ca. 55% der Verschleißmaxima der übrigen Versuche ausmacht. Fertigungstoleranzen hinsichtlich der Wandstärken der Cu-Rohre oder Schwankungen in der chemischen Zusammensetzung, die zu unterschiedlichen Materialfestigkeiten der Cu-Rohre geführt haben können, wären u. a. Gründe, die zu dem deutlich geringeren Verschleiß an

Cu-Rohr 15 geführt haben können. In diesen Versuchen mit Ballenförderung wird somit in den Einlaufkrümmern ein auf die Fördergutmasse normierter Cu-Rohr-Wanddickenverschleiß von $9,0 \cdot 10^{-5} \text{ mm/kg}$ bis $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ mm/kg}$ maximal erreicht. Die Auslaufkrümmen liefern bei Ballenförderung Verschleißmaxima von $0,6 \cdot 10^{-5} \text{ mm/kg}$ bis $1,2 \cdot 10^{-4} \text{ mm/kg}$. Die Verschleißmaxima aller hier betrachteten Krümmen liegen charakteristisch zwischen 18 mm und 22 mm ab Beginn der Krümmerauswandlänge.

Für die Einlauf- und Auslaufkrümmen der durch Ballenförderung verschlissenen Cu-Rohre sind gemäß Kapitel 6.4.3 weiterhin die normierten Verschleißflächen inklusive ihrer Streuung und empirischer Varianz über die Ergebnisse der Verschleißversuche mit den eingesetzten Rohren 15 bis 18 berechnet und in Tabelle 7.3-2 zusammengefasst worden. Die Ergebnisse der normierten Verschleißflächen der Einlauf- und Auslaufkrümmen in $(\text{rad} \cdot \text{mm})/\text{kg}$ sind ebenfalls mit ihrer Streuung und empirischer Varianz über die Verschleißergebnisse der Versuche mit den verwendeten Rohren 15 bis 18 in Tabelle 7.3-2 dargestellt.

Gesamtverschleiß in mm^2/kg			Gesamtverschleiß in $\text{rad} \cdot \text{mm}/\text{kg}$		
	Einlauf	Auslauf		Einlauf	Auslauf
Rohr 15	0,00136	0,00107	Rohr 15	0,000059	0,000046
Rohr 16	0,00218	0,00151	Rohr 16	0,000095	0,000066
Rohr 17	0,00236	0,00190	Rohr 17	0,000103	0,000083
Rohr 18	0,00246	0,00203	Rohr 18	0,000107	0,000089
Streuung	0,00050	0,00044	Streuung	0,000022	0,000019
Gesamtverschleiß in $(\text{mm}^2/\text{kg})^2$			Gesamtverschleiß in $(\text{rad} \cdot \text{mm}/\text{kg})^2$		
empirische Varianz	2,50E-07	1,90E-07	empirische Varianz	4,75E-10	3,62E-10

Tabelle 7.3-2: Gesamtverschleißübersicht der Cu-Rohre 15, 16, 17 und 18

Tabelle 7.3-3 bietet abschließend eine Zusammenstellung charakterisierender Größen, die während der Verschleißmessungen an den Cu-Rohren 15, 16, 17 und 18 ermittelt wurden.

				Mittelwerte über alle Flanken der Verschleißmessung				
Cu-Rohr	Zeit in h	Förderzustand	Fördergutmasse in kg	Gutmassenstrom in kg/s	Gasvolumenstrom am MDM1 in SLPM	v_0 , mittel in m/s	Druckdiff./Länge in bar/m	Beladung
15	4	Ballen	807	0,06	21,9	1,53	0,09	67
16	4	Ballen	596	0,04	17,6	1,51	0,12	74
17	4	Ballen	610	0,04	21,8	1,86	0,11	84
18	4	Ballen	816	0,06	15,6	1,62	0,12	88

Tabelle 7.3-3: Übersicht der Mittelwerte der Verschleißmessungen

Die bisherige Verschleißberechnung bezieht sich auf eine Längsschnittbetrachtung von Cu-Rohren gemäß Abbildung 6.4-1. Der in der Pilotanlage verwendete transparente und gewebeverstärkte PVC-Schlauch mit einem Innendurchmesser von 13 mm und einer Wandstärke von $3,5 \text{ mm}$ musste nach ca. 200 Betriebsstunden ersetzt werden. Die Abbildungen 7.3-3 und 7.3-4 zeigen den tatsächlichen Flächenverschleiß dieses PVC-Förderschlauches aus der Praxis.

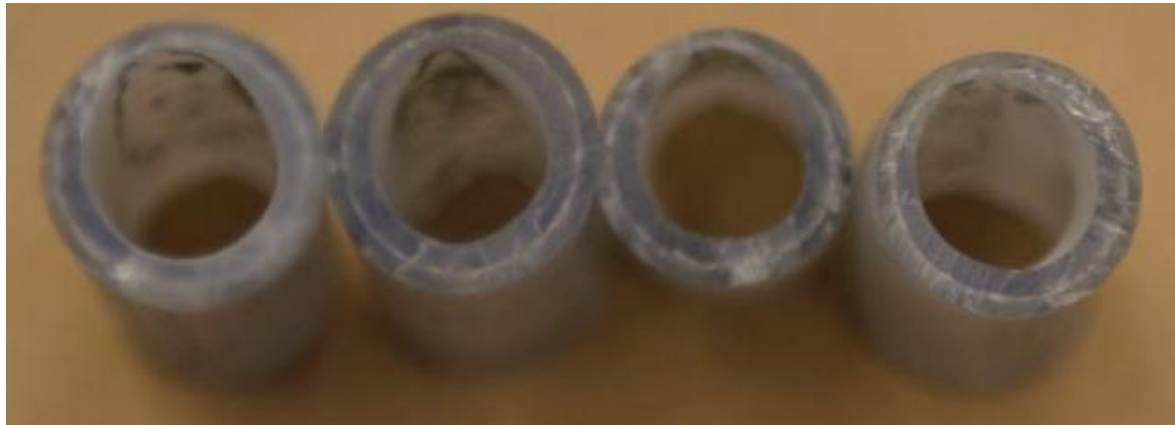


Abbildung 7.3-3: Querschnitte der verschlissenen PVC-Förderschlauchabschnitte

Die Abbildungen 7.3-3 und 7.3-4 zeigen PVC-Förderschlauchabschnitte mit einer durch Abrasion bedingten Wandstärkenabnahme bis zur Lochbildung in den 90°-Krümmern. An den Querschnitten in Abbildung 7.3-3 ist eine deutliche Abnahme der Wanddicke ersichtlich. Diese Wanddickenabnahme ist uneinheitlich über den Rohrleitungsquerschnitt ausgeprägt. Die unterbrochene Linie in Abbildung 7.3-4 zeigt die Schnittebene, die bei den Untersuchungen an den Cu-Rohren für den Längsschnitt gewählt wurde. Sie verläuft deutlich durch das in der Praxis hiermit nachgewiesene Verschleißmaximum, das sich im Innern der Krümmeraussenwand befindet. Das reale Verschleißvolumen zeigt eine charakteristische Tropfenform.

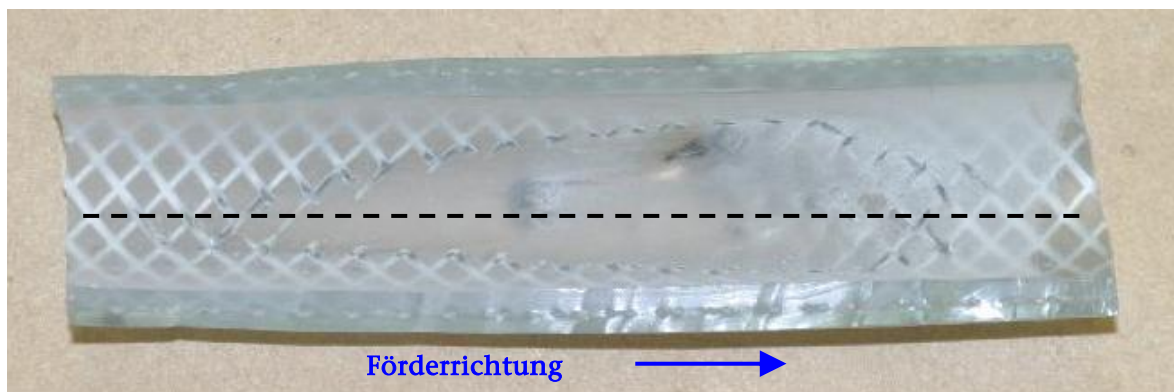


Abbildung 7.3-4: Verschleißfläche im Längsschnitt eines verschlissenen PVC-Förderschlauchabschnittes

Sowohl nach [Kun93] als auch nach [Som10] lässt sich mit der hier durchgeführten Betrachtung des Förderleitungsverleißes nachweisen, dass Förderleitungen aus elastischem Material wie der PVC-Schlauch der Pilotanlage weniger Verschleiß aufweisen als hartes Material wie das Metall Kupfer aus den Verschleißversuchen.

[Nie06] schreibt, dass der Verschleiß der Krümmen und Rohrleitungen mit der dritten Potenz der Fördergeschwindigkeit zunimmt. Wie [Kra82] anmerkt, findet ein Anstieg des Verschleißes der Förderleitungen bei Fördergasraten, die oberhalb der Strähnen-/Ballenförderung liegen statt. Grund hierfür ist ein Fördergasüberschuss im Verhältnis zum Fördergut. Die Partikel treffen so mit hoher Geschwindigkeit auf die Rohrwand und hier besonders auf die Eingänge der Rohrkrümmen. Bei der Betrachtung des Dichtstromes hingegen ergeben sich diese Zusammenhänge nicht in dem Maße, da hier die Partikel innerhalb des Ballens untereinander wechselwirken, indem sie zusammenstoßen [Kle89]. Zudem besitzen die Teilchen aufgrund der geringeren Fördergasrate und somit herabgesetzten Fördergutgeschwindigkeit eine niedrigere kinetische Energie.

7.3.1 Unsicherheiten der Verschleißmessungen

Die Punktmessung stellt in der vorliegenden Arbeit die kleinste Einheit einer Messung dar. Jede Verschleißmessung besteht aus mehreren Flanken (Entleerzyklen des Fluidisierers), die wiederum jeweils mehrere Punktmessungen enthalten. Grundsätzlich unterscheiden sich Verschleißmessungen von FZD-Messungen in der Größe ihrer Datenbasis. FZD-Messungen sind Punktmessungen über 20s, die störungsfrei ohne Absperrblasenbetrieb ermittelt wurden. Verschleißmessungen sind jeweils vierstündig und beinhalten sowohl mehrere störungsfreie Flankenverläufe mit Messbetrieb als auch die sich hiermit abwechselnden Zeiten mit Absperrblasenbetrieb (Fluidisiererfüllphasen). Somit sind die Unsicherheiten für Verschleißmessungen im Vergleich zu FZD-Messungen durchführungsbedingt größer.

Alle erfassten Messgrößen und die von ihnen abgeleiteten Größen weisen Unsicherheiten auf. Bei der exemplarischen Betrachtung einer typischen Beispielmessung ergibt sich eine geförderte Fördergutmasse von $1,12\text{ kg}$ innerhalb dieser 20s mit einer Streuung von 7,5%. Dies entspricht einem mittleren Fördergutmassenstrom von $0,056\text{ kg/s}$ während dieser Punktmessung. Die Druckdifferenzmomentanwerte weisen eine Gleichverteilung auf. Der Mittelwert der Druckdifferenz dieser Punktmessung über die gesamte Förderstrecke beträgt $(1,9 \pm 0,1)\text{ bar}$, was einer Streuung von 4,4% entspricht. Bei Betrachtung der während dieser Punktmessung im Bereich der Ballenförderung erfassten Fördergasvolumenstrommesswerte am Förderstreckenende zeigt sich ebenso eine Gleichverteilung der Messwerte des MDM1. Der Mittelwert der MDM1-Messwerte von Punktmessung 284 in Flanke 14 der Messung 6 liegt bei $23,3\text{ NLPm}$ und die Streuung beträgt 23,1%. In der Pilotanlage ist ein Massendurchflussmesser am Förderstreckenbeginn eingesetzt, um den Fördergasvolumenstrom ohne förderzustandsbedingte Streuungsanteile zu bestimmen. Dieser MDM3 zeigt während einer Punktmessung eine typische Streuung von 1%. Bei weiterer Betrachtung dieser ausgewählten Punktmessung ist für die abgeleitete Größe der Leerrohrgeschwindigkeit eine mittlere Streuung von 7,7% bestimmbar und für die Beladung beträgt die mittlere Streuung 12,6%. Die anlagen- und durchführungsbedingten Abweichungen während der Verschleißversuche überwiegen jedoch diese bisher beschriebenen und werden im Weiteren näher betrachtet.

In Kapitel 7.1.1 wird deutlich, dass sich bei ausgeprägter Ballenförderung die pneumatische Förderung der Pilotanlage auch während einer längeren Messung innerhalb eines begrenzten Fördergutmassenstrombereichs einstellt. Die hier exemplarisch betrachtete Flanke 14 von Messung 6 ähnelt den Messungen 13 und 14 in den Tabellen B-6 und B-7. Wie die statistische Auswertung für die Fördergutmassenstromkategorien $0,03$ bis $< 0,04\text{ kg/s}$ und $0,04$ bis $< 0,05\text{ kg/s}$ in Tabelle 7.1.1-1 gezeigt hat, sind bei Ballenförderung innerhalb dieser Fördergutmassenstromkategorien bereits Streuungen von 13,2% für den Gutmassenstrom, 5,9% für die auf die Förderstreckenlänge bezogene Druckdifferenz, 28,6% für den Gasmassenstrom, 25,9% für die Leerrohrgeschwindigkeit und 31,6% für die Beladung zu erwarten.

Bei Messung 6 handelt es sich um einen Dichtstrom-Verschleißversuch bei dem das Cu-Rohr 15 in einer vierstündigen Messung eingesetzt war. Anhand der Flanke 14 dieser Messung werden im Folgenden die Verläufe der Druckdifferenz und des vom MDM1 detektierten Gasvolumenstroms exemplarisch dargestellt. Abbildung 7.3.1-1 zeigt den Verlauf der Druckdifferenz derselben Flanke. Bedingt durch den Förderzustand der Ballenförderung detektieren die beiden DMU am Anfang und Ende der Förderstrecke Schwankungen des Momentandrucks an dem jeweiligen Messort. Ebenfalls erkennbar ist eine kontinuierliche Verringerung der Druckdifferenz mit fortschreitender Messzeit der Flanke. Ursächlich hierfür sind die Momentanwerte des DMU1 zu sehen, die aufgrund der sich verringernden Fördergutmasse im Fluidisierer während der Flanke abnehmen. Auch hierdurch wird ein Bereich des Förderzustandsdiagramms überstrichen.

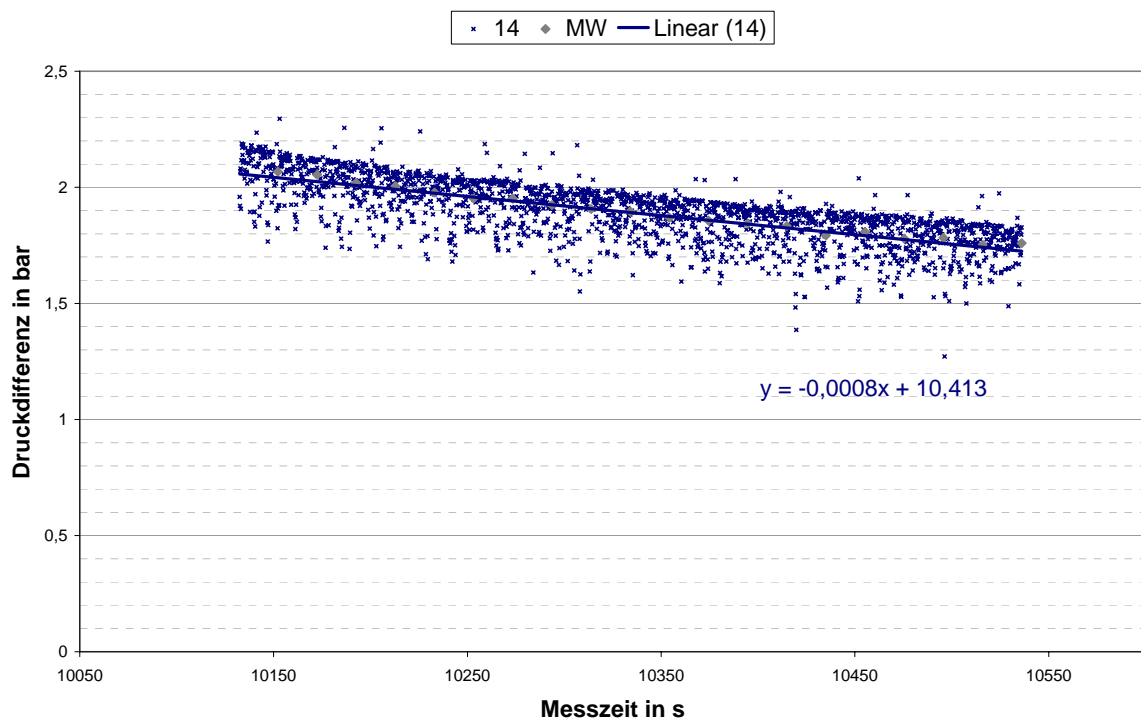


Abbildung 7.3.1-1: Verlauf der Druckdifferenz in Flanke 14 von Messung 6

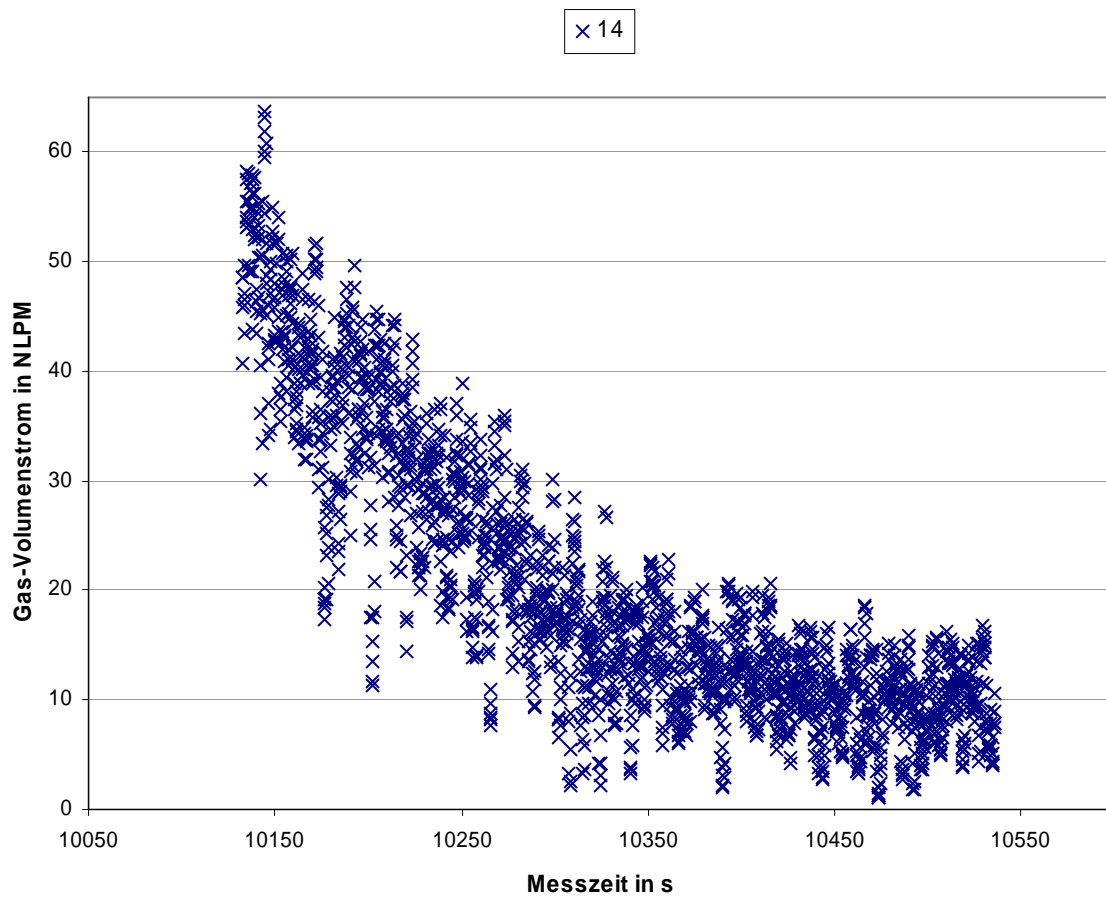


Abbildung 7.3.1-2: Verlauf des Gas-Volumenstroms des MDM1 in Flanke 14 von Messung 6

Der in Abbildung 7.3.1-2 dargestellte Gasvolumenstrom-Flankenverlauf des MDM1 dieser exemplarisch betrachteten Flanke zeigt die durch die Ballenförderung bedingte Fluktuation und ebenfalls ein Durchlaufen eines Förderzustandsbereiches.

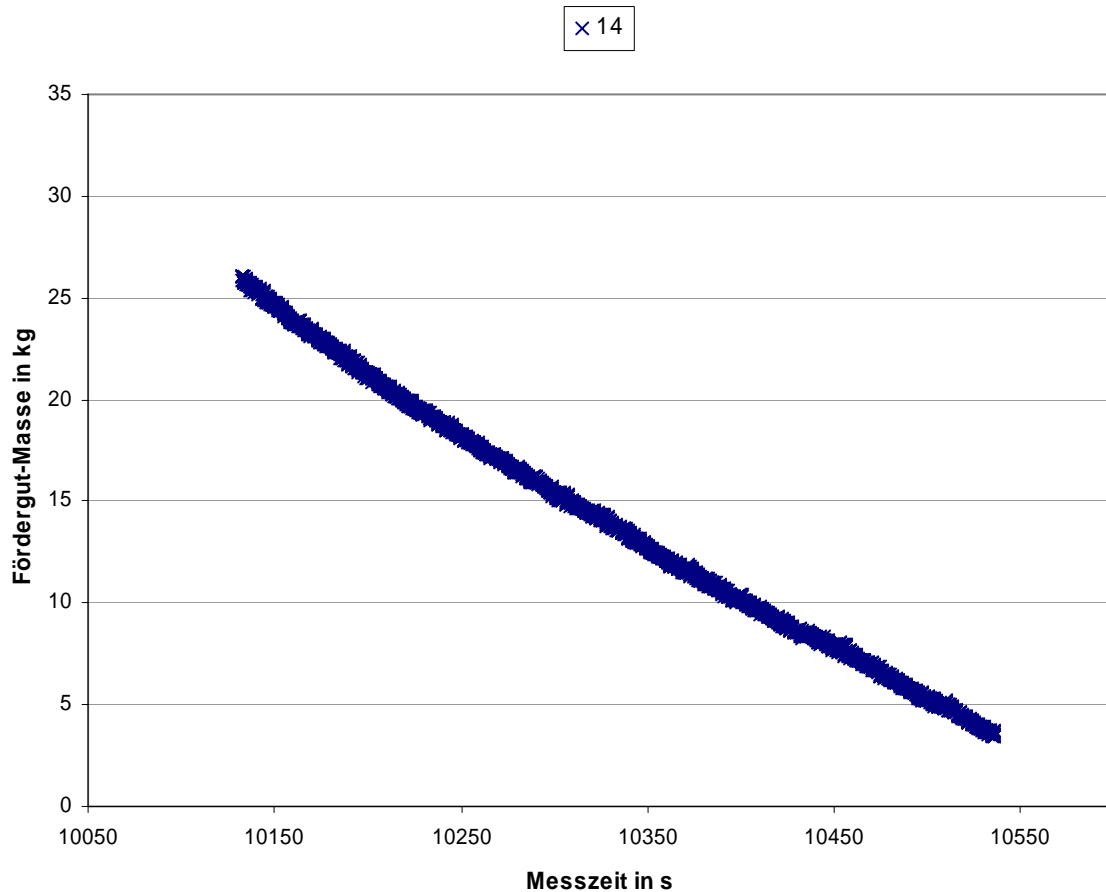


Abbildung 7.3.1-3: Verlauf der Wägezellenmessung in Flanke 14 von Messung 6

Wie sowohl Abbildung 7.3.1-3 als auch Abbildung 6.2.1-1 bereits exemplarisch belegen, verändert sich der Fördergutmassenstrom von Punktmessung zu Punktmessung im Verlauf einer Flanke. Dies bedeutet, dass während jeder Flanke ein Bereich des Förderzustandsdiagramms betrachtet wird, der größer ist als der, der einer einzelnen Punktmessung, wie z. B. einer FZD-Messung, zugrunde liegt. Abhängig vom gewählten Fördergutmassenstrombereich variiert auch dieser Effekt in seiner absoluten Größe.

Innerhalb einer Verschleißmessung wird vorausgesetzt, dass die pneumatische Förderung in den Zeiten mit Absperrblasenbetrieb weiterhin den Förderzustandsbereich beibehält, den sie während der Messflanken annimmt. Die bei den Verschleißmessungen gewonnenen Ergebnisse beziehen sich aufgrund der Tatsache, dass sich diese Messungen über mehrere vollständige Messflanken und Zeiten mit Absperrblasenbetrieb erstrecken, jedoch in praxi jeweils auf einen größeren Bereich des Förderzustandsdiagramms.

8 Schlussfolgerungen und Diskussion

Die Bedingungen der Kohlenstaubförderung in den Hochofen lassen sich mit der entwickelten Versuchstechnik und einem ähnlichen Streckenverlauf qualitativ und bezüglich der beobachteten Phänomene gut nachbilden. Die Messergebnisse lassen sich konsistent in Zustandssystemen darstellen. In die Ergebnisse des halbempirischen Modells, basierend auf den Erkenntnissen von Szikszay zur Druckverlustrechnung für pneumatische Strähnen- und Pfropfenförderung [Szi90], gehen Messdaten mit ein, indem Modellparameter teilweise aus ihnen bestimmt werden.

Die Fördercharakteristik hängt vom Streckenverlauf ab, lokal wie bezogen auf die gesamte Strecke. In steigenden Abschnitten herrscht Ballenförderung, in fallenden Desintegration in Strähnen. Für zukünftige Betrachtungen wäre die Untersuchung eines Modells zur lokalen Beschreibung des Druckverlaufs und der Fördercharakteristik unter experimenteller Veränderung des Leitungsverlustes angebracht.

Als technische Konsequenz sollte der letzte Streckenabschnitt vor Eintritt des Kohlenstaubs in die Blasform fallend gewählt sein, um die Ausbildung pulsationsanfälliger Ballenförderung an diesem Ort zu vermeiden. Des Weiteren sollte dieser Streckenabschnitt eine für die Desintegration der Ballen ausreichende Länge bieten. Um die Fördergaseinleitung in den Hochofen vorteilhaft zu reduzieren kann gegebenenfalls vor diesem letzten fallenden Streckenabschnitt ein Teil des Fördergases abgeleitet und dem System zu Förderstreckenbeginn wieder zugeführt werden, da im letzten fallenden Streckenabschnitt weniger Förderdruck notwendig ist. Eine mögliche technische Ausführung hierfür stellt Abbildung 8-1 dar, mit einem Zyklonpuffer zur Druck- und Massenstromvergleichsmessung und einer optimierten Endstrecke der pneumatischen Förderung vor der Blasform. Diese Lösung wird z. B. in ähnlicher Form von verschiedenen Firmen, u. a. der Fa. Küttner-Anlagenbau aus Essen, angeboten. In weiterführenden zukünftigen Arbeiten könnte solch ein Zyklon verwendet werden.

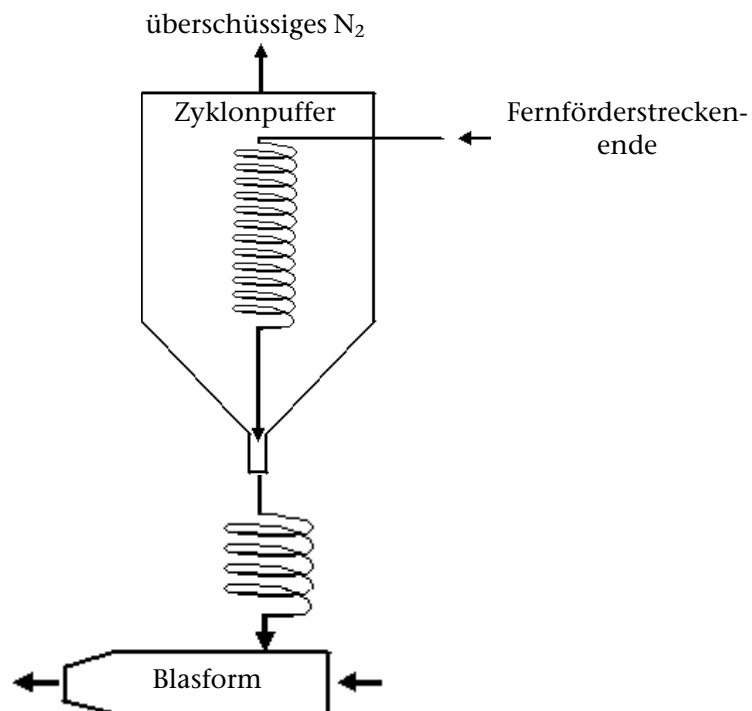


Abbildung 8-1: Blasform und optimierter Endstreckenteil mit Zyklonpuffer

9 Zusammenfassung

Der bei der Roheisenerzeugung verwendete Koks besitzt aufgrund der eingeschränkten Auswahl der für die Koksherstellung nutzbaren Kohlesorten im Vergleich mit anderen Energielieferanten deutliche Kostennachteile. Diese höheren Kosten bilden die Basis für die Überlegungen, den Koksverbrauch bei der Roheisenerzeugung zu senken.

Die Ermittlung einer optimalen Beschickung mit Kohlenstaub auf Basis des pneumatischen Einblasens in den Hochofen der AG der Dillinger Hütte bildet die Motivation dieser Arbeit. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dafür eine Pilotanlage entwickelt, in der alle Förderzustände in horizontaler, wie auch in vertikaler Richtung mit und entgegen der Schwerkraft eingestellt werden konnten. Verschiedene Förderzustände des pneumatischen Förderns wurden untersucht. Die Pilotanlage erlaubte dabei sowohl die Untersuchung instabiler Förderzustände aus dem Dichtstrom- und Übergangsbereich Ballen-/Strähnenförderung, sowie stabiler Förderzustände aus Strähnen- und Flugförderung.

In Kapitel 2 erfolgte der theoretische Vergleich der Förderzustände Dichtstromförderung und Dünnstromförderung miteinander. Es zeigte sich, dass die höchsten Fördergutraten zwar im Bereich der reinen Dünnstromförderung zu erzielen waren, hierbei aber sehr hohe Fördergasraten notwendig sind. Dieser hohe Verbrauch des Fördermediums lässt einen ökonomischen Betrieb der Anlage nicht zu. Zudem geht mit hohen Gasraten und den damit verbundenen Fördergeschwindigkeiten ein ausgeprägter Verschleiß der Förderleitungen einher. Bei der Dichtstromförderung war eine hohe Fördergutrate bei gleichzeitig niedrigen Raten des Fördermediums zu verzeichnen. Ein geringer Verbrauch an Fördergas allein reicht jedoch nicht aus, um einen optimalen Hochofenbetrieb gewährleisten zu können. Durch die Reduzierung der Fördergeschwindigkeit fällt der Feststoff aus dem Fördermedium aus. Es wird zwar ein hoher Füllgrad der Förderleitung erreicht, jedoch kommt es durch die sich bildenden Pfropfen zu Pulsationen beim Einblasen in den Hochofen. Dies führt einerseits zu einer unvollständigen Verbrennung, andererseits besteht die Gefahr der Einlagerung verkokter Partikel im Bereich des toten Manns. Es zeigte sich im Verlauf der Versuche, dass der Übergangsbereich zwischen Dicht- und Dünnstromförderung einen guten Kompromiss in Bezug auf eine optimale Förderung und bestmögliche Verbrennung darstellen kann. Dieser Übergangsbereich zwischen Ballen- und Strähnenförderung stellt sicher, dass sich keine dichten Pfropfen ausbilden können. Zudem wird die Gefahr der stehenden Säule und somit der Verstopfung durch das Fördergut im Förderleitungssystem ausgeschlossen. Ein weiterer Vorteil ist die Vermeidung der Verkokung im toten Mann. Zudem wäre ein vertikal fallender Förderstreckenverlauf unmittelbar vor den Blasformen des Hochofens von Vorteil, da eventuell ausgeprägte Fördergutpfropfen aufgrund der Schwerkraft im fallenden Förderleitungsabschnitt fragmentieren und somit der Kohlenstaub möglichst pulsationsfrei eingeblasen werden kann. Das Fördergut wird hinreichend weit in den Hochofen gefördert, eine Leistungssteigerung des Hochofens ist hiermit erzielbar. Ferner ist nur ein geringer Anlagenverschleiß zu erwarten. Des Weiteren besteht die grundsätzliche Möglichkeit vor der fallenden Leitung überschüssiges Fördergas, dessen am Hochofen zugeführte Menge aus energetischen Gründen klein sein sollte, abzublasen und dem Kreislauf wieder zuzuführen. Weitere Untersuchungen zu dieser Thematik wären an dieser Stelle angebracht.

Aus diesem Grund wurde die Pilotanlage auf den Übergangsbereich zwischen der Ballen- und Strähnenförderung hin optimiert. Da der hier verwendete Quarzsand in sehr guter Näherung ähnliche Fließeigenschaften wie der Kohlenstaub aufweist, fiel die Entscheidung, den Quarzsand in der Pilotanlage zu verwenden. Sein Vorteil gegenüber dem Kohlenstaub liegt in der bleibenden Transparenz des Förderschlauches. Bei Verwendung des Kohlenstaubes erfolgt eine Schwärzung durch Anhaftung der Partikel an der Innenfläche der Förderleitung, die eine Beobachtung der Förderzustände nicht mehr zuließe.

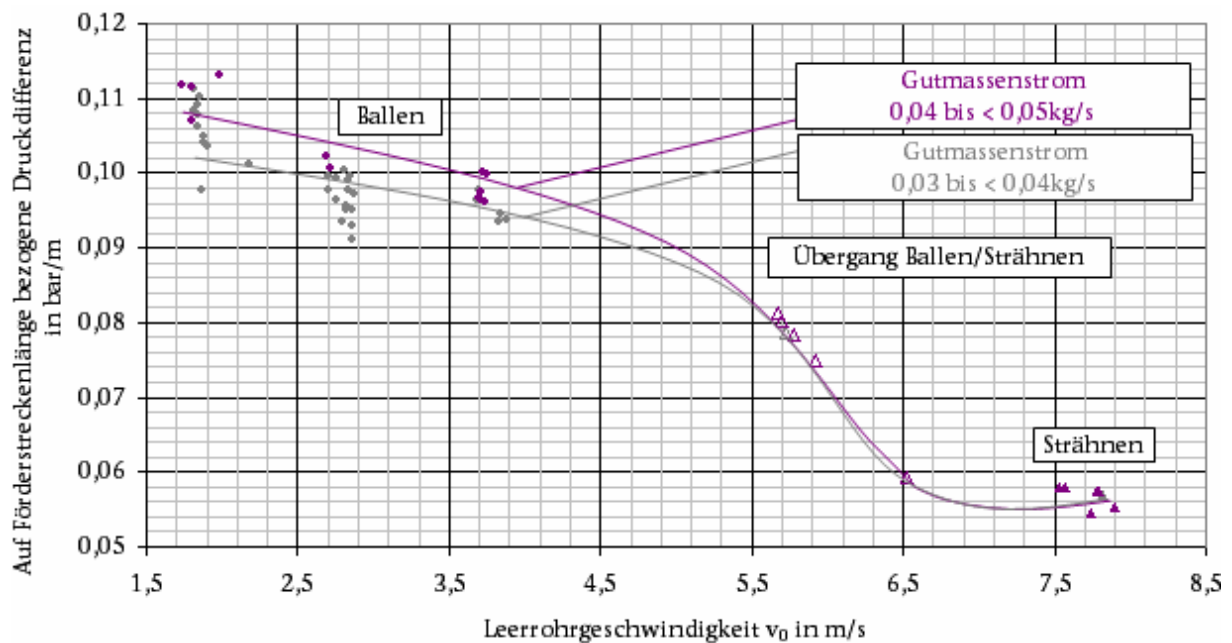


Abbildung 9-1: Ausschnitt aus experimentell ermitteltem Förderzustandsdiagramm

Das in Kapitel 7 erstellte Förderzustandsdiagramm, das in Abbildung 9-1 ausschnittsweise zu sehen ist, wurde dem mathematischen Modell nach Szikszay-Klößner [Szi87], [Szi90] vergleichend gegenübergestellt. Hiermit ist bei pneumatischer Förderung im Übergangsbereich Ballen- und Strähnenförderung allgemein auf Basis von jeweils fünf Punktmessungen pro Fördergutmassenstromkategorie ein mathematischer Zusammenhang formulierbar, der die realen Verhältnisse hinreichend genau wiedergibt. Die in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse können auf Anlagen im industriellen Maßstab übertragen werden, jedoch müssen die typischen Fließeigenschaften der gemahlene Kohle im Gegensatz zu dem in dieser Arbeit verwendeten Quarzsand als Modellschubstanz berücksichtigt werden.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [Bar58] W. Barth: Strömungsvorgänge beim Transport von Festteilchen und Flüssigkeitsteilchen in Gasen. Chem.-Ing.-Tech. 30, Nr. 3, S. 171 – 180, 1958
- [Ber⁺99] H. Bertiaux, J. Dodds: Modelling fine grinding in a fluidized bed opposed jet mill – Part 2: Continuous grinding, Powder Technology 106, pp. 88-97, 1999
- [Bir⁺60] R.B. Bird, W.E. Steward, E.N. Lightfoot: Transport Phenomena, John Wiley, 1960
- [Boh83] M. Bohnet: Fortschritte bei der Auslegung pneumatischer Förderanlagen. Chem.-Ing.-Tech. 55, Nr. 7, S. 524 – 539, 1983
- [Bra57] H. Brauer: Druckverlust in Füllkörpersäulen bei Einphasenströmung, Chemie-Ingenieur-Technik, 29. Jahrgang, Nr. 12, S. 785-790, 1957
- [Bri07] M. Brillouin: Lecons sur la viscosité des liquides et des gaz, Gauthier-Villars, Paris, 1907
- [Buc14] E. Buckingham: On physically similar systems: Illustration of the use of dimensional equations. Physical Review, Vol. 4, pp. 345-376, 1914
- [Cap⁺88] J. Cappel, M. Geerdes, K. Langer, H.B. Lungen: Stand der Kohleeinblastechik bei den Mitgliedswerken des VDEH, Stahl und Eisen 108, Nr. 9, S. 459-467, 1988
- [Cap90] J. Cappel: Diskussion der Planung und des Betriebes einer Anlage zum Mahlen und Einblasen von Feinkohle in den Hochofen, sowie Lösungsvorschläge zu Betriebsvorschlägen, Ph.D. thesis, RWTH Aachen, 2/1990
- [Chi⁺31] T.H. Chilton, A.P. Colburn: Ind. Eng. Chem., 23, 913, 1931
- [DUB07] Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau, 22. Auflage L 40, Springer Verlag Berlin, 2007
- [End95] Endress und Hauser: Berührungslose Messung der Durchflussleistung, Schüttgut, Vol. 1, Nr. 2, S. 424, 1995
- [Erg⁺49] S. Ergun, A.A. Orning: Fluid Flow through Randomly Packed Columns and Fluidized Beds, Coal research laboratory and department of chemical engineering, Carnegie inst. of techn., Pittsburgh, PA., 1949

- [Est01] S. Esterl: Dissertation, Numerische Simulation der Strömung und des Stofftransportes in Festbett-Bioreaktoren, TU München, Fakultät für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, S. 23-41, 2001
- [Eve07] A. Evert: Äther – Physik und – Philosophie, Band 2, Plasma und Teilchen-Bewegung, Herstellung und Verlag: BoD–Books on Demand, Norderstedt, 2007
- [Fra⁺02] T. Frank, K. Bernert, K. Bachler, H. Schneider: Berechnungsverfahren für disperse Fluid-Partikel-Strömungen, VDI-GVT Fachtagung, Arbeitssitzung des GVC-Fachausschusses „Mehrphasenströmung“, Magdeburg, 5.-7. März 2002
- [FSE03] Fast Set Epoxy Resin: Datenblatt PP-140, 21.05.2003
- [Gla77] W. Glatzel: Verschleiß von Rohrkrümmern beim pneumatischen Transport, Dissertation, TU Berlin, 1977
- [Gud⁺85] W. Gudenau, T. Ariyama, B. Kortas, T. Yang: Kohlenstaubeinblasen in den Hochofen, Stahl und Eisen 105, Nr. 4, S. 211-220, 1985
- [Hau⁺85] G. Hauser und G. Lübke: Schonende pneumatische Förderung in Brauereien und Mälzereien. Monatsschrift für Brauwissenschaft 38, Heft 11, S. 432 – 439, 1985
- [Ger⁺97] W. Gericke, K.E. Wirth: Pneumatische Schüttgutförderer, zweite ergänzte Auflage, herausgegeben von der Firma Gericke AG, Regensdorf-Zürich, S. 26, 1997
- [Goe06] R. Goedecke: Fluid-Verfahrenstechnik, Grundlagen, Methodik, Technik, Praxis, Band 2, WILEY-VCH Verlag GmbH, S. 196, 2006
- [Gut78] M. Gutzke: Einblasen von Kohlenstaub in den Hochofen, Stahl und Eisen, Nr. 23, S. 1243-1244, 1978
- [Her08] A. Herrmann: Diplomarbeit, Untersuchung und Optimierung von pneumatischer Gießpulverzugabe an den Stranggießanlagen der Salzgitter-Flachstahl GmbH, 2008
- [Hon⁺95] J. Hong, Y. Shen, Y. Tomita: Phase-diagrams in dense phase pneumatic transport, Powder Technology, 84:213–219, Sep 1995
- [Hot05] Hottinger und Baldwin Messtechnik GmbH: Datenblatt, U2A Wägezellen, Darmstadt, 2005
- [Hot06] Hottinger und Baldwin Messtechnik GmbH: Datenblatt, Dehnungsmessstreifen der Serie Y, Darmstadt, 2006
- [IFC12] 5th International Freiberg Conference, Sonderkolloquium 60. Jahrestag erster Braunkohlenkoks, S. 17, 22. Mai 2012

-
- [IPP01] Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel, S. 224, Dezember 2001
- [Jes64] R. Jeschar: Druckverlust in Mehrkornschüttungen aus Kugeln, Archiv für das Eisenhüttenwesen, 35. Jahrgang, Heft 2, S. 91-108, 1964
- [Kac⁺05] G. Kache, Th. Kollmann, J. Tomas: Wandreibungsverhalten hochdispenser, kohäsiver Pulver unter Schwingungseinwirkung, Schüttgut, Nr. 11, S. 156-163, 2005
- [Kle89] Klein: Verschleißarmer pneumatischer Transport von Abfallsanden und ähnlichen Stoffen, Sonderdruck aus GIESSEREI, Heft 7/1989, Giesserei-Verlag GmbH, 1989
- [Koe⁺86] W. Koen, R.B. Vogel, H.L. Toxopeus, G.A. Fliermann: Injection of coal into the Hoogovens blast furnace, Iron and Steelmaking, Nr. 13, S. 29-36, 1986
- [Kob01] Kobold: Bedienungsanleitung für elektronische Massendurchflussmesser Typ: MAS-3015, Hofheim, 2001
- [Kob09] Kobold: Calibration after adjustment, Certificate number 122236-6967452, page 1, 09.06.2009
- [Kra⁺82] V. Kragelski, M. Dobycin, V. Kombalor: Grundlagen der Berechnung von Reibung und Verschleiß, VEB Verlag Technik, Berlin 1982
- [Kra04] M. Kraume: Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik, VDI-Buch, Teil II, S. 335-356, 2004
- [Kru98] Krupp Polysius AG: Verfahren und Anlage zum pneumatischen Fördern und Einblasen von Schüttgütern in einen metallurgischen Schmelzreaktor, Patentschrift, EP 0922773A1, Beckum, 06.11.1998
- [Kun93] H. Kunst: Verschleißhemmende Schichten, Grundlagen des Verschleißverhaltens von Eisenwerkstoffen und praktische Maßnahmen zur Verminderung, Expert-Verlag, 1993
- [Kus04] J. Kussin: Dissertation, Experimentelle Studien zur Partikelbildung und Turbulenzmodifikation in einem horizontalen Kanal bei unterschiedlichen Wandrauigkeiten, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2004
- [Leg81] D. Legel: Dissertation, Horizontale pneumatische Propfenförderung, TU Braunschweig, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik, 1981
- [Leh06] G. Lehne: Zerkleinern und Partikelgrößenanalyse, Institut für Partikeltechnik, TU Braunschweig, Verfahrenstechnisches Labor, S.14-15, 2006

- [Len84] D.R. Lennon: Pneumatic conveying of pulverized solvent refined coal, US, pp. 4, 480, 560, 1984
- [Lev⁺47] M. Leva, M. Gummer: Chem. Eng. Progress, 43, S. 549-554, S. 633-638, S. 713-718, 1947
- [Loe05] Loesche GmbH: Verfahren zur pneumatischen Förderung von Feststoffen, Patentschrift, DE10356480B4, Düsseldorf, 27.10.2005
- [Lot02] M. Lotfey: Dissertation, Numerische Simulation von Gas-Gas und Gas-Feststoffinjektoren, TH Karlsruhe, Fakultät für Maschinenbau, S. S. 66-73, 2002
- [Lüt⁺93] Lüttgens, M. Glor: Statische Elektrizität begreifen und sicher beherrschen, Expert Verlag, Ehingen bei Böblingen, 1993
- [Man09] Mann und Hummel GmbH : Datenblatt, Specification for Air Filter, Filter Type MANN C 32 120, Ludwigsburg, 11.05.2009
- [Mey03] F. Meyer: Diplomarbeit, Untersuchung der pneumatischen Förderung beim Einblasen von Kohle in den Hochofen, Dillingen, 30.01.2003
- [Mey11] M. Meyer: Signalverarbeitung: Analoge und digitale Signale, Systeme und Filter , Taschenbuch, Vieweg+Teubner Verlag, 18. 04. 2011
- [Mus⁺59] E. Muschelknautz et al.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen über die Druckverluste pneumatischer Förderleitungen unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses von Gutreibung und Gutgewicht, VDI, VDI-Forschungsheft 476, Ausgabe B, Band 25, Karlsruhe, 1959
- [Mus⁺69] E. Muschelknautz und W. Krambrock: Vereinfachte Berechnung horizontaler pneumatischer Förderleitungen bei hoher Gutbeladung mit feinkörnigen Produkten. Chem.-Ing.-Tech. 41, Nr. 21, S. 1164 – 1172, 1969
- [Mus⁺74] E. Muschelknautz und H. Wojahn: Auslegung pneumatischer Förderanlagen. Chem.-Ing.-Tech. 48, Nr. 6, S. 223 – 272, 1974
- [Mus⁺86] E. Muschelknautz, F. Nemecek und R. Reuter: Druckverlust bei der Flugförderung. Chem.-Ing.-Tech. 58, Nr. 7, S. 598–599, 1986
- [Mül07] W. Müller: Mechanische Grundoperationen und ihre Gesetzmäßigkeiten, Durchströmung von Partikelschichten, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, S. 109-158, 2007

-
- [Nie⁺02] G. Niederreiter, K. Sommer: Investigations on Formation and Stability of Plugs at Dense Phase Conveying, Proceedings of the World Congress on Particle Technology 4, Sydney, Australia, 2002
- [Nie06] G. Niederreiter: Dissertation, Untersuchung zur Pfropfenentstehung und Pfropfenstabilität bei der pneumatischen Dichtstromförderung, TU-München, 2006
- [Noy⁺00] P.D. Noymer, L.R. Glicksman, Descent velocities of particle cluster at the wall of circulation fluidized bed, Chemical Engineering Science 55, pp. 5282 - 5287, 2000
- [Ost⁺63] E.J. Ostrowski, J.R. Dietz: Solid fuel injection at Weirton, Journal Metals, S. 499-501, 1963
- [Pah⁺93] M.H. Pahl, R. Ernst, H. Wilms: Lagern, Fördern und Dosieren von Schüttgütern, Praxiswissen Verfahrenstechnik, 2. überarbeitete Auflage, Fachbuchverlag Leipzig, 1993
- [Pau99] Paul Wurth: Patentschrift, Vorrichtung zum Einblasen von Kohlenstaub in einen Hochofen, Dok.identifikation DE 69322002T2Q, 01.04.1999
- [Pos06] O. Posch: Dissertation, Numerische Untersuchung der Zweiphasenströmung in den Gutaufgabeinjektor, TU-Wien, Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswirtschaft, S. 34, 2006
- [Pra⁺84] L. Prandtl, K. Oswatitsch und K. Wieghardt: Führer durch die Strömungslehre. 8. Überarb. Aufl., Verl. Vieweg; Braunschweig/Wiesbaden; Fachbuchverlag, 1984
- [Qua03] Quarzwerke GmbH – Quarzsand- und Mahlwerk Weferlingen: Stoffdaten WF32, S.1-2, 10/2003
- [Rie97] Riegler: Datenblatt, Druckluftaufbereitung, Feinfilter Typ 685 G ½, April 1997
- [Ros05] M. Rosenberger: Materialdatenblatt Silikon-Kautschuk-Schlauch, Kautschuk-Kunststoff-Technik Frölich, Osterode am Harz, 2005
- [Rud97] S. Rudolph: Isotrope versus anisotrope Ähnlichkeit im fallbasierten Schließen. Proceedings 5th German Workshop on Case-Based Reasoning GWCBR'97, Bad Honnef, S. 189-199, 1997
- [Rud02] S. Rudolph: Übertragung von Ähnlichkeitsbegriffen. Habilitationsschrift, Fakultät 6: Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie, Universität Stuttgart, 2002

- [Sag07] C. Sager: Dissertation, Der Partikeltransport in turbulent durchströmten Rohrleitungen und seine besondere Bedeutung für die Partikelmesstechnik, S. 41-49, 2007
- [Sal⁺02] A.D Salman, M.J Hounslow, A. Verba: Particlefragmentation in dilute phasepneumatic conveying, Powder Technology 126, pp. 109-115, 2002
- [Saw61] O. Sawatzki: Dissertation, Über den Einfluß der Rotation und der Wandstöße auf die Flugbahn kugelig Teilchen im Luftstrom, TH-Karlsruhe, 1961
- [Sch⁺85] K. Scheidig, R. Mösch, J. Lahr: Betriebssicherheit einer KOSTE-Anlage, Neue Hütte 30, Nr. 2, S. 42-43, 1985
- [Sch89] K. Schneider: Pneumatisches Einzel/Mehrstrang-Dosiersystem bei variablem Gegendruck, Jahrbuch der Dampferzeugungstechnik, Kapitel IV, Vulkan Verlag, Essen, S. 506-516, 1989
- [Sch95] K. Schwertfeger: Theoretische Hüttenkunde II, Vorlesungsskript 1995, (unpublished)
- [Sch⁺02] H.P. Schlag, E. Muschelknautz, W. Krambock: Druckverlust in pneumatischen Transportanlagen, VDI-Wärmeatlas, Springer Verlag, Heidelberg, 9 Ed., S. 1-16, 2002
- [Seg34] G. Segler: Untersuchungen an Körnergebläsen und Grundlagen für ihre Berechnung, Mannheim, 1934
- [Sie91] W. Siegel: Pneumatische Förderung, Grundlagen, Auslegung, Anlagenbau, Betrieb, Vogel Verlag, 1. Auflage, Würzburg, 1991
- [Sie99] Siemens: Semiconductor Group, Datenblatt, GaAlAs-IR-Lumineszenzdioden (880nm), Typ SFH 485, S.1-5, 02.04.1999
- [Som⁺10] K. Sommer, R. Heinz, J. Schäfer: Verschleiß metallischer Werkstoffe, Erscheinungsformen sicher beurteilen, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010
- [Spi06] K.-H. Spitzer: Mathematische Beschreibung von Systemen, Vortrag Hoch-Temperatur-Kolleg, TU-Clausthal, 03.05.2006
- [Sta06] H. Stahl: Pneumatische Saugförderanlage mit computergestützter Messdatenerfassung und computergestützter Regelung, Laborversuch, Fachhochschule Hannover, S. 6, 2006

-
- [Sta⁺04] U. Stark, A. Müller: Korngröße und Kornform von Recyclingbaustoffen – schnelle und effektive Methode zur Beurteilung, »Ratgeber Abbruch & Recycling, S.78 - S.83, Stein-Verlag Baden-Baden, 2004
- [Sti92] M. Stieß: Mechanische Verfahrenstechnik 1, Springer-Verlag 1992
- [Sti09] M. Stieß: Mechanische Verfahrenstechnik-Partikeltechnologie 1, 3. Auflage, Springer Verlag Heidelberg, S. 112-125, 2009
- [Str05] M. Strauß: Untersuchung der Pfropfdynamik und –stabilität bei der vertikalen und horizontalen Pfropfenförderung, Universität Stuttgart, 2005
- [Sur⁺07] D. Surek, S. Stempin: Angewandte Strömungsmechanik für Praxis und Studium, Teubner Verlag Wiesbaden, S. 167, 2007
- [Sym07] Sympatec: CPB Grinding Seminar 2007, 27.-29.08.2007, Clausthal-Zellerfeld
- [Szi87] G. Szikszay: Feststoffreibungsbeiwert bei der pneumatischen Druckförderung, Ph.D. thesis, Universität Karlsruhe, 1987
- [Szi90] G. Szikszay, Klöckner: Druckverlust bei der pneumatischen Pfropfen- und Strähnenförderung, Chemie-Ingenieur-Technik 62, Nr. 9, S.755-759, Sept. 1990
- [TAO00] TAOS: Texas advanced opto electronic solutions, IR light-to-voltage optical sensors TSL260, page 2-3, 2000
- [Tsu00] Y. Tsuji: Activities in discrete particle simulation in Japan, Powder Technology 113, pp. 279-285, 2000
- [VDI02] VDI-Wärmeatlas: 9. Auflage, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurtechnik, 2002
- [Vog⁺03] L. Vogel, W. Peukert: Modelling of grinding in an air classifier mill based on a fundamental material function, KONA Powder and Particle 21, pp. 109-120, 2003
- [Von⁺01] H. Vondruska, J. Hochhaus: Stand der Technik des Feinkohleeinblasens bei der Rogesa, Konferenzbericht, 6.-7.9.2001, VDEh Düsseldorf, 9/2001
- [Wad35] H. Wadell: Volume, Shape and Roundness of Quartz Particles, Journal of Geology, 43, S.250-280, 1935
- [Was98] E. Wassen: Dissertation, Entwicklung paralleler Algorithmen zur numerischen Simulation von Gas-Partikel-Strömungen unter Berücksichtigung von Partikel-Partikel-Kollisionen, TU-Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau und

- Verfahrenstechnik, 1998
- [Wei⁺06] R. Weiser, I. Braune, P. Matthes,: Control Blast Furnace Pulverized Coal Injection to Increase PCI Rates, AMEPA Aachen,S. 335-343, 2006
- [Wel62] G. Welschof: Pneumatische Förderung bei großen Fördergutkonzentrationen, VDI-Forschungsheft 492, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1962
- [Wel86] G. Welschof: Pneumatische Förderung bei großen Fördergutkonzentrationen. VDI Forschungsheft 492, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1986
- [Wen⁺03] J. Wendelstorf, K.-H. Spitzer: Technik und experimenteller Aufbau zu Untersuchungen zum pneumatischen Fördern von Kohlestaub, Bericht Nr.: TUC-IMET-MP-6590, Teil 1, Institut für Metallurgie, Technische Universität Clausthal, 2003
- [Wer⁺04] J. Werther, E.-U. Hartge, G. Gruhn: Fließschema-Simulation von Feststoffprozessen, Chemie Ingenieur Technik, Nr. 76, S. 709-713, 2004
- [Wer08] Werkstoffzentrum Rheinbach GmbH: Röntgenbeugungsanalyse (RBA) Röntgenphasenanalyse, Rheinbach, Vortragsreihe, Juni 2008
- [WIK06] WIKA: Elektronische Druckmesstechnik, WIKA-Datenblatt PE81.01, Druckmessumformer für allgemeine Anwendungen, Typ S-11, frontbündige Membrane, S.1-4, 09/2006
- [Wir80] K.E. Wirt: Dissertation, Theoretische und experimentelle Bestimmung von Zusatzdruckverlust und Stopfgrenze bei pneumatischer Strähnenförderung, Universität Erlangen, 1980
- [Wyp⁺93] P.W. Wypych, P.C. Arnold: Minimising Wear and Particle Damage in Pneumatic Conveying, University of Wollongong, Department of Mechanical Engineering, published in Journal: powder handling & processing, vol. 5, no.2, page 129, 1993
- [Yan85] T. Yang: Dissertation, Untersuchungen zum Kohlenstaubeinblasen in den Hochofen, RWTH Aachen, 1985

Abbildungsverzeichnis

2-1:	Schema des Hochofenprozesses nach [IFC12]	5
2.1-1:	Partikelbewegungen in Leitungen nach [Eve07]	7
2.1-2:	Unterteilung der Förderzustände [Nie06]	8
2.1.1-1:	Förderzustand Pfropfenförderung real und schematisch	10
2.1.1-2:	Förderzustand Strähnenförderung real und nach [VDI02]	11
2.1.2-1:	Förderzustandsdiagramm aus [Ger+97], [Her08]	13
2.1.2-2:	Dimensionsloser Druckabfall als Funktion der Reynoldszahl nach [Bir+60]	19
4.2-1:	Komplettansicht der Pilotanlage	28
4.2-2:	Injektoren (rechts optimierte Variante)	29
4.2-3:	Verbindungsrohr	30
4.2-4:	Absperrblasen	31
4.2-5:	Flansch zur Aufnahme der Absperrblasen	31
4.2-6:	Funktion der Absperrblasen	32
4.2-7:	Elektromagnetisches Ventil	32
4.2-8:	Vereinfachtes Prinzip der Anlage – Förderkreislauf	33
4.3-1:	Impuls-Diagramm der Absperrblasensteuerung mit Ventilverhalten	36
4.4-1:	Prozessschema des experimentellen Aufbaus	38
4.4.1-1:	MDM am Ende der Förderstrecke	39
4.4.1-2:	Schematische Darstellung eines Massendurchflussmessers aus [Kob01]	39
4.4.2-1:	DMU mit Adapter und Halterung	41
4.4.2-2:	Aufbau Druckmessumformer	42
4.4.2-3:	Diagramm zur DMU-Skalierung	43
4.4.3-1:	IR-LED oben und IR-Sensor unten eingefasst in einer Aluminiumhalterung	44
4.4.3-2:	Schematische Darstellung eines Licht-Spannungs-Wandlers	45
4.4.3-3:	LSW-Diagramm mit verschiedenen Förderzuständen	46
4.4.4-1:	Foto einer Stahlaufnahmescheibe mit 2 Dehnungsmessstreifen	47
4.4.4-2:	Schematische Darstellung der Aufnahmescheibe aus Stahl und Position der Dehnungsmessstreifen zur Druckmessung in der Leitung	48
4.4.4-3:	Skalierung des DMS1 in bar	49
4.4.5-1:	In Pilotanlage eingebaute Wägezelle	50
4.4.5-2:	Funktionsweise der Wägezelle, schematischer Aufbau und Signalweg	50
4.4.5-3:	Skalierung der Wägezelle in kg	51

4.4.6-1:	Kupferrohr mit 2 90°-Krümmern	52
4.4.6-2:	Kupferrohr mit 2 45°-Krümmern	52
5.1.1-1:	Verwendetes Röntgenpulverdiffraktometer	54
5.1.1-2:	Charakteristische Röntgendiffraktometeraufnahme des SiO ₂ am Beispiel des alten Sandes	55
5.1.1-3:	Charakteristische Röntgendiffraktometeraufnahme des SiO ₂ am Beispiel des Staubes	56
5.3.1-1:	Mikroskopische Aufnahme des Sandes	59
5.3.1-2:	Mikroskopische Aufnahme des neuen Sandes	60
5.3.1-3:	Mikroskopische Aufnahme des alten Sandes	60
5.3.1-4:	Mikroskopische Aufnahme des Abriebes bei 100-facher Vergrößerung	61
5.3.2-1:	Reproduzierbarkeit der Summenkurve – neuer Sand	63
5.3.2-2:	Reproduzierbarkeit der Summenkurve – alter Sand	63
5.3.2-3:	Vergleich der Summenkurven alter/neuer Sand	64
5.3.2-4:	Vergleich der Dichtekurven alter/neuer Sand	64
5.3.2-5:	Sphärizität des neuen Sandes	66
5.3.2-6:	Sphärizität des alten Sandes	66
5.3.2-7:	Vergleich der Sphärizität alter/neuer Sand	67
6.1-1:	Schematischer Flankenverlauf der Wägezellenmessung	70
6.1-2:	Flankenverlauf der Wägezellenmessung	71
6.2.1-1:	Exemplarische Fördergutmassenstrombestimmung aus Wägezellenmesswerten der Punktmessungen aus Flanke 1 von Messung 14	74
6.4.-1:	Cu-Rohr mit zwei 90°-Krümmern im Längsschnitt, rote Pfeile markieren die Stellen des höchsten Verschleißes	82
7.1.1-1:	Mittelwerte der Punktmessungen von DMS1, vertikal-steigend, Förderstreckenanfang	86
7.1.1-2:	Mittelwerte der Punktmessungen von LSW1, vertikal-steigend, Förderstreckenanfang	87
7.1.1-3:	Parameter Förderzeitenverhältnis der ausgewählten Punktmessungen	87
7.1.1-4:	Mittelwerte der Punktmessungen von DMS2, vertikal-fallend, Förderstreckenmitte	88
7.1.1-5:	Mittelwerte der Punktmessungen von LSW2, vertikal-fallend, Förderstreckenmitte	89
7.1.1-6:	Zusammenstellung der Mittelwerte der Punktmessungen von LSW1 und LSW2	89
7.1.1-7:	Streuung der Messwerte vom Mittelwert der Punktmessung des MDM1	90

7.1.2-1:	Repräsentative Punktmessung während Ballenförderung	93
7.1.2-2:	Repräsentative Punktmessung während Übergang Ballen-/Strähnenförderung	94
7.1.2-3:	Repräsentative Punktmessung während Strähnenförderung	95
7.1.2-4:	Messdatenauswahl zur FFT-Berechnung bei Ballen-/Strähnenförderung	97
7.1.2-5:	FFT-Ergebnis der MDM1-Daten bei Ballen-/Strähnenförderung während Messung 12 Punktmessung 23 bis 26	97
7.2.1-1:	Förderzustandsdiagramm mit mittlerer Leerrohrgeschwindigkeit und Beladung als Kennlinienparameter	100
7.2.1-2:	Förderzustandsdiagramm mit mittlerer Leerrohrgeschwindigkeit und Fördergutmassenstrom als Kennlinienparameter	101
7.2.1-3:	FZD für rieselfähige Schüttgüter mit Korngrößen $>10 \mu m$, 150 mm Leitungsquerschnitt und Fördermedium Luft aus [VDI02] mit Fördergutmassenstrom als Parameter	102
7.2.2-1:	Förderzustandsdiagramm mit Ergebnissen aus Experiment und Modellrechnung - Fördergutmassenstrom als Kennlinienparameter	105
7.2.2-2:	Förderzustandsdiagramm aus [Szi90]	106
7.3-1:	Gegenüberstellung des Cu-Rohr-Wanddickenverschleißes des Einlauf- und Auslaufkrümmers	107
7.3-2:	Gegenüberstellung des Cu-Rohr-Wanddickenverschleißes der Einlauf- und Auslaufkrümmers der Rohre 15, 16, 17 und 18	108
7.3-3:	Querschnitte der verschlissenen PVC-Förderschlauchabschnitte	110
7.3-4:	Verschleißfläche im Längsschnitt eines verschlissenen PVC-Förderschlauchabschnittes	110
7.3.1-1:	Verlauf der Druckdifferenz in Flanke 14 von Messung 6	112
7.3.1-2:	Verlauf des Gas-Volumenstroms des MDM1 in Flanke 14 von Messung 6	112
7.3.1-3:	Verlauf der Wägezellenmessung in Flanke 14 von Messung 6	113
8-1:	Blasform und optimierter Endstreckenteil mit Zyklonpuffer	115
9-1:	Ausschnitt aus experimentell ermitteltem Förderzustandsdiagramm	118

Tabellenverzeichnis

2.2-1:	Heywoodfaktoren für Kornformen verschiedener Schüttgüter nach [Leh06]	21
2.2-2:	Sphärizitäten in Abhängigkeit der Geometrie aus [Sta04]	22
4.4-1:	Liste der Messgrößen	37
5.1.2-1:	Beschreibung des neuen Sandes gemäß technischen Datenblatts des Quarzwerkes Weferlingen [Qua03]	57
5.1.2-2:	Ergebnisse der quantitativen chemischen Analyse zum Vergleich von neuem Sand, altem Sand und Staub	57
5.2-1:	Physikalische Stoffdaten des neuen Sandes gemäß technischen Datenblatts des Quarzwerkes Weferlingen [Qua03]	58
5.4-1:	Übersicht der relevanten Daten und Befunde zum Fördergut Quarzsand	68
6.2.6-1:	Genauigkeiten der Parameter des Förderzustandsdiagramms	77
6.3-1:	Abgeleitete Größen einer Punktmessung zur Modellberechnung im Förderzustandsdiagramm und ihre Genauigkeiten	81
7.1.1-1:	Statistische Auswertung über alle FZD-Messungen der Fördergutmassenstromkategorien 0,03 bis < 0,04 kg/s und 0,04 bis < 0,05 kg/s	91
7.2.2-1:	Ergebnisse der Modellrechnungen	104
7.3-1:	Übersicht der Wäageergebnisse der Cu-Rohre 15, 16, 17 und 18	107
7.3-2:	Gesamtverschleißübersicht der Cu-Rohre 15, 16, 17 und 18	109
7.3-3:	Übersicht der Mittelwerte der Verschleißmessungen	109
B-1	Statistische Betrachtung ausgewählter Punktmessungen – Teil 1 DMS1, LSW1, DMS2 und LSW2	140
B-2	Statistische Betrachtung ausgewählter Punktmessungen – Teil 2 MDM1 und MDM3	141
B-3	Statistische Betrachtung ausgewählter Punktmessungen – Teil 3	142
B-4	FZD-Messungen der Fördergutmassenstromkategorien 0,03 bis < 0,04 kg/s und 0,04 bis < 0,05 kg/s – Teil 1	143

B-5	FZD-Messungen der Fördergutmassenstromkategorien 0,03 bis <0,04 kg/s und 0,04 bis <0,05 kg/s – Teil 2	144
B-6	FZD-Punktmessungen – Ballenförderung Teil 1	145
B-7	FZD-Punktmessungen – Ballenförderung Teil 2	146
B-8	FZD-Punktmessungen – Übergang Ballen-/Strähnenförderung	147
B-9	FZD-Punktmessungen – Strähnenförderung	148
B-10	Ausgewählte Punktmessungen für Modellrechnungen – Teil 1	149
B-11	Ausgewählte Punktmessungen für Modellrechnungen – Teil 2	150

Anhang

A Versuchsergebnisse zur statistischen Auswertung der Korngrößenanalyse

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse zur Korngrößenanalyse des neuen Sandes durchgeführt am 06.08.2007, sowie ihre graphische Darstellung und statistische Auswertung von der Firma Sympatec in Clausthal-Zellerfeld.

MESSVORSCHRIFT

Produktbezeichnung	: Sand (TU-CLZ, Inst. f. Metallurgie)
Probenvorbereitung	: Probenteilung mittels rotierendem Riffelteiler
Sensor	: QICPIC
Dispergiermethode	: GRADIS
Meßbereich QICPIC	: 1.00 63.0 mm - M7 (10...3410µm)
Einwaage	: 18 g
Startbedingung der Messung	: c.opt >= 0,01%
Stoppbedingung der Messung	: 10s c.opt <= 0,01% oder 999s Echtzeit
Bildrate	: 200,00 Hz
Anzahl der Einzelbilder	: 108752,67 (105215,00 - 113055,00)
gemessene Partikelanzahl	: 351176,00 (346525,00 - 353773,00)
Meßzeit	: 544,02 s (526,47 s - 565,49 s)
Optische Konzentration	: 0,2374 % (0,2268 % - 0,2468 %)
Förderrate VIBRI	: 5,00 %
Trichterhöhe	: 2,00 mm
Spaltweite GRADIS	: mm
Anzahl gemessener Teilproben	: 3
Messungen pro Teilprobe	: 1
QICPIC Auswertemodus	: EQPC;
Klassengrenzen	: M7

Ergebnis-Dokumentation (siehe Folgeseiten)

Statistische Auswertung der Analysedaten

QICPIC (Q0108) & GRADIS, 1.00 63.0 mm - M7 (10...3410µm)

Produkt: Sand (TU-CLZ, Inst. f. Metallurgie)			Auswertung:		
Dichte: 1,00 g/cm ³			Berechnungsmodus: EQPC (5.3.1.0)		
Probennummer: ---			Partikelanzahl: 351176,00 (346525,00 - 353773,00)		
			Klassengrenzen: M7		
Messbedingung: 200Hz, oko0.01%, 10-999s			Dispergiermethode: 4x10, feed5%, gap2, nil		
Bildrate: 200,00 Hz			Dosierer: VIBRI		
Start: c.opt >= 0,01%			Förderrate: 5,00 %		
Stopp: 10s c.opt <= 0,01% oder 999s Echtzeit			Trichterhöhe: 2,00 mm		
Messdauer: 544,02 (526,47 - 565,49) s			Fallhöhe: 50,00 cm		
opt. Konzentration: 0,2374 (0,2268 - 0,2468) %			zus. Informationen: V-Rinne, Spalt 4*10		
Allgemeine Informationen			Kunde: TU-CL, Inst. f. Metallurgie		
Probenteilung: ja			Bediener: Fei		
Probenmenge: 18 g			Datenbank: QICPIC JANUAR 2007		
Messungen			Kennungen		
2007-08-06 14:53:19.7250 0108 Q			Sand_M7_003		
2007-08-06 15:06:46.6240 0108 Q			Sand_M7_004		
2007-08-06 15:20:38.9900 0108 Q			Sand_M7_005		
Klassen- obergrenze x ₀ [µm]	Verteilungs- summe Q ₃ [%]	Standard- abweichung abs. [%]	Fraktion dQ ₃ [%]	Klassen- mitte (log) x _m [µm]	Verteilungs- dichte (log) q3*
10,00	0,00	0,0000	0,00	7,07	0,00
12,15	0,00	0,0000	0,00	11,02	0,00
14,75	0,00	0,0000	0,00	13,39	0,00
17,92	0,00	0,0000	0,00	16,26	0,00
21,76	0,00	0,0000	0,00	19,75	0,00
26,43	0,00	0,0001	0,00	23,98	0,00
32,10	0,00	0,0001	0,00	29,13	0,00
38,99	0,00	0,0002	0,00	35,38	0,00
47,36	0,00	0,0004	0,00	42,97	0,00
57,52	0,00	0,0007	0,00	52,19	0,00
69,86	0,01	0,0011	0,00	63,39	0,00
84,86	0,02	0,0017	0,01	77,00	0,00
103,06	0,04	0,0019	0,03	93,52	0,00
125,18	0,12	0,0021	0,08	113,58	0,01
152,04	0,35	0,0033	0,23	137,96	0,03
184,66	1,07	0,0057	0,72	167,56	0,09
224,29	3,81	0,0350	2,74	203,51	0,32
272,41	13,47	0,0832	9,66	247,18	1,14
330,87	33,43	0,2063	19,95	300,22	2,36
401,86	53,35	0,2663	19,92	364,64	2,36
488,09	68,07	0,2651	14,72	442,88	1,74
592,83	78,94	0,2773	10,87	537,92	1,29
720,03	86,47	0,1956	7,54	653,34	0,89
874,54	91,36	0,1410	4,88	793,53	0,58
1062,19	95,18	0,1264	3,82	963,81	0,45
1290,12	98,12	0,0591	2,94	1170,62	0,35
1566,95	99,70	0,1886	1,58	1421,81	0,19
1903,18	100,00	0,0000	0,30	1726,90	0,04
2311,55	100,00	0,0000	0,00	2097,45	0,00
2807,56	100,00	0,0000	0,00	2547,51	0,00
3410,00	100,00	0,0000	0,00	3094,15	0,00
x₁₀ = 255,10 µm +/- 0,33 µm		x₅₀ = 389,93 µm +/- 0,91 µm		x₉₀ = 831,59 µm +/- 4,75 µm	
x₁₆ = 279,81 µm +/- 0,29 µm		x₈₄ = 678,27 µm +/- 3,77 µm		x₉₉ = 1445,58 µm +/- 14,49 µm	

Einzelmessung Sand_M7_003

QICPIC (Q0108) & GRADIS, 1.00 63.0 mm - M7 (10...3410µm)

Produkt: Sand (TU-CLZ, Inst. f. Metallurgie)				Auswertung:			
Dichte: 1,00 g/cm ³				Berechnungsmodus: EQPC (5.3.1.0)			
Probennummer: ---				Partikelanzahl: 353773			
				Klassengrenzen: M7			
Messbedingung: 200Hz, oko0.01%, 10-999s				Dispergiermethode: 4x10, feed5%, gap2, nil			
Bildrate: 200 Hz				Dosierer: VIBRI			
Start: c.opt >= 0,01%				Förderrate: 5,00 %			
Stopp: 10s c.opt <= 0,01% oder 999s Echtzeit				Trichterhöhe: 2,00 mm			
Messdauer: 526,47 s				Fallhöhe: 50,00 cm			
opt. Konzentration: 0,2468 %				zus. Informationen: V-Rinne, Spalt 4*10			
Allgemeine Informationen				Kunde: TU-CL, Inst. f. Metallurgie			
Probenteilung: ja				Messung: 2007-08-06 14:53:19.7250 0108 Q			
Probenmenge: 18 g				Bediener: Fei			
				Datenbank: QICPIC JANUAR 2007			
Klassen- obergrenze x ₀ [µm]	Verteilungs- summe Q ₃ [%]	Rückstand (1-Q ₃) [%]	Fraktion dQ ₃ [%]	Klassen- mitte (lin) x _m [µm]	Verteilungs- dichte (lin) q ₃ [1/mm]	Klassen- mitte (log) x _m [µm]	Verteilungs- dichte (log) q ₃ *
10,00	0,00	100,00	0,00	7,50	0,00	7,07	0,00
12,15	0,00	100,00	0,00	11,07	0,00	11,02	0,00
14,75	0,00	100,00	0,00	13,45	0,00	13,39	0,00
17,92	0,00	100,00	0,00	16,33	0,00	16,26	0,00
21,76	0,00	100,00	0,00	19,84	0,00	19,75	0,00
26,43	0,00	100,00	0,00	24,10	0,00	23,98	0,00
32,10	0,00	100,00	0,00	29,27	0,00	29,13	0,00
38,99	0,00	100,00	0,00	35,55	0,00	35,38	0,00
47,36	0,00	100,00	0,00	43,18	0,00	42,97	0,00
57,52	0,00	100,00	0,00	52,44	0,00	52,19	0,00
69,86	0,01	99,99	0,00	63,69	0,00	63,39	0,00
84,86	0,02	99,98	0,01	77,36	0,01	77,00	0,00
103,06	0,04	99,96	0,03	93,96	0,01	93,52	0,00
125,18	0,12	99,88	0,08	114,12	0,04	113,58	0,01
152,04	0,35	99,65	0,23	138,61	0,09	137,96	0,03
184,66	1,08	98,92	0,73	168,35	0,22	167,56	0,09
224,29	3,85	96,15	2,77	204,47	0,70	203,51	0,33
272,41	13,56	86,44	9,71	248,35	2,02	247,18	1,15
330,87	33,65	66,35	20,09	301,64	3,44	300,22	2,38
401,86	53,65	46,35	20,00	366,36	2,82	364,64	2,37
488,09	68,37	31,63	14,73	444,98	1,71	442,88	1,74
592,83	79,26	20,74	10,88	540,46	1,04	537,92	1,29
720,03	86,70	13,30	7,44	656,43	0,58	653,34	0,88
874,54	91,47	8,53	4,77	797,29	0,31	793,53	0,57
1062,19	95,08	4,92	3,61	968,37	0,19	963,81	0,43
1290,12	98,18	1,82	3,10	1176,15	0,14	1170,62	0,37
1566,95	99,63	0,37	1,45	1428,53	0,05	1421,81	0,17
1903,18	100,00	0,00	0,37	1735,06	0,01	1726,90	0,04
2311,55	100,00	0,00	0,00	2107,37	0,00	2097,45	0,00
2807,56	100,00	0,00	0,00	2559,56	0,00	2547,51	0,00
3410,00	100,00	0,00	0,00	3108,78	0,00	3094,15	0,00
x₁₀ = 254,77 µm x₅₀ = 388,92 µm x₉₀ = 826,99 µm SMD = 385,77 µm VMD = 475,12 µm							
x₁₆ = 279,51 µm x₈₄ = 673,93 µm x₉₉ = 1446,83 µm							

Einzelmessung Sand_M7_004

QICPIC (Q0108) & GRADIS, 1.00 63.0 mm - M7 (10...3410µm)

Produkt: Sand (TU-CLZ, Inst. f. Metallurgie)				Auswertung:			
Dichte: 1,00 g/cm ³ Probennummer: ---				Berechnungsmodus: EQPC (5.3.1.0) Partikelanzahl: 346525 Klassengrenzen: M7			
Messbedingung: 200Hz, oko0.01%, 10-999s				Dispergiermethode: 4x10, feed5%, gap2, nil			
Bildrate: 200 Hz Start: c.opt >= 0,01% Stopp: 10s c.opt <= 0,01% oder 999s Echtzeit Messdauer: 565,49 s opt. Konzentration: 0,2268 %				Dosierer: VIBRI Förderrate: 5,00 % Trichterhöhe: 2,00 mm Fallhöhe: 50,00 cm zus. Informationen: V-Rinne, Spalt 4*10			
Allgemeine Informationen				Kunde: TU-CL, Inst. f. Metallurgie			
Probenteilung: ja Probenmenge: 18 g				Messung: 2007-08-06 15:06:46.6240 0108 Q Bediener: Fei Datenbank: QICPIC JANUAR 2007			
Klassen- obergrenze x ₀ [µm]	Verteilungs- summe Q ₃ [%]	Rückstand (1-Q ₃) [%]	Fraktion dQ ₃ [%]	Klassen- mitte (lin) x _m [µm]	Verteilungs- dichte (lin) q ₃ [1/mm]	Klassen- mitte (log) x _m [µm]	Verteilungs- dichte (log) q ₃ *
10,00	0,00	100,00	0,00	7,50	0,00	7,07	0,00
12,15	0,00	100,00	0,00	11,07	0,00	11,02	0,00
14,75	0,00	100,00	0,00	13,45	0,00	13,39	0,00
17,92	0,00	100,00	0,00	16,33	0,00	16,26	0,00
21,76	0,00	100,00	0,00	19,84	0,00	19,75	0,00
26,43	0,00	100,00	0,00	24,10	0,00	23,98	0,00
32,10	0,00	100,00	0,00	29,27	0,00	29,13	0,00
38,99	0,00	100,00	0,00	35,55	0,00	35,38	0,00
47,36	0,00	100,00	0,00	43,18	0,00	42,97	0,00
57,52	0,00	100,00	0,00	52,44	0,00	52,19	0,00
69,86	0,01	99,99	0,00	63,69	0,00	63,39	0,00
84,86	0,02	99,98	0,01	77,36	0,01	77,00	0,00
103,06	0,04	99,96	0,03	93,96	0,01	93,52	0,00
125,18	0,12	99,88	0,08	114,12	0,04	113,58	0,01
152,04	0,35	99,65	0,22	138,61	0,08	137,96	0,03
184,66	1,07	98,93	0,72	168,35	0,22	167,56	0,09
224,29	3,82	96,18	2,75	204,47	0,69	203,51	0,33
272,41	13,47	86,53	9,66	248,35	2,01	247,18	1,14
330,87	33,39	66,61	19,92	301,64	3,41	300,22	2,36
401,86	53,26	46,74	19,87	366,36	2,80	364,64	2,35
488,09	67,93	32,07	14,66	444,98	1,70	442,88	1,74
592,83	78,78	21,22	10,85	540,46	1,04	537,92	1,29
720,03	86,39	13,61	7,61	656,43	0,60	653,34	0,90
874,54	91,40	8,60	5,01	797,29	0,32	793,53	0,59
1062,19	95,32	4,68	3,92	968,37	0,21	963,81	0,46
1290,12	98,13	1,87	2,81	1176,15	0,12	1170,62	0,33
1566,95	99,55	0,45	1,43	1428,53	0,05	1421,81	0,17
1903,18	100,00	0,00	0,45	1735,06	0,01	1726,90	0,05
2311,55	100,00	0,00	0,00	2107,37	0,00	2097,45	0,00
2807,56	100,00	0,00	0,00	2559,56	0,00	2547,51	0,00
3410,00	100,00	0,00	0,00	3108,78	0,00	3094,15	0,00
x₁₀ = 255,11 µm x₅₀ = 390,21 µm x₉₀ = 831,29 µm SMD = 387,04 µm VMD = 477,04 µm							
x₁₆ = 279,83 µm x₈₄ = 680,11 µm x₉₉ = 1459,40 µm							

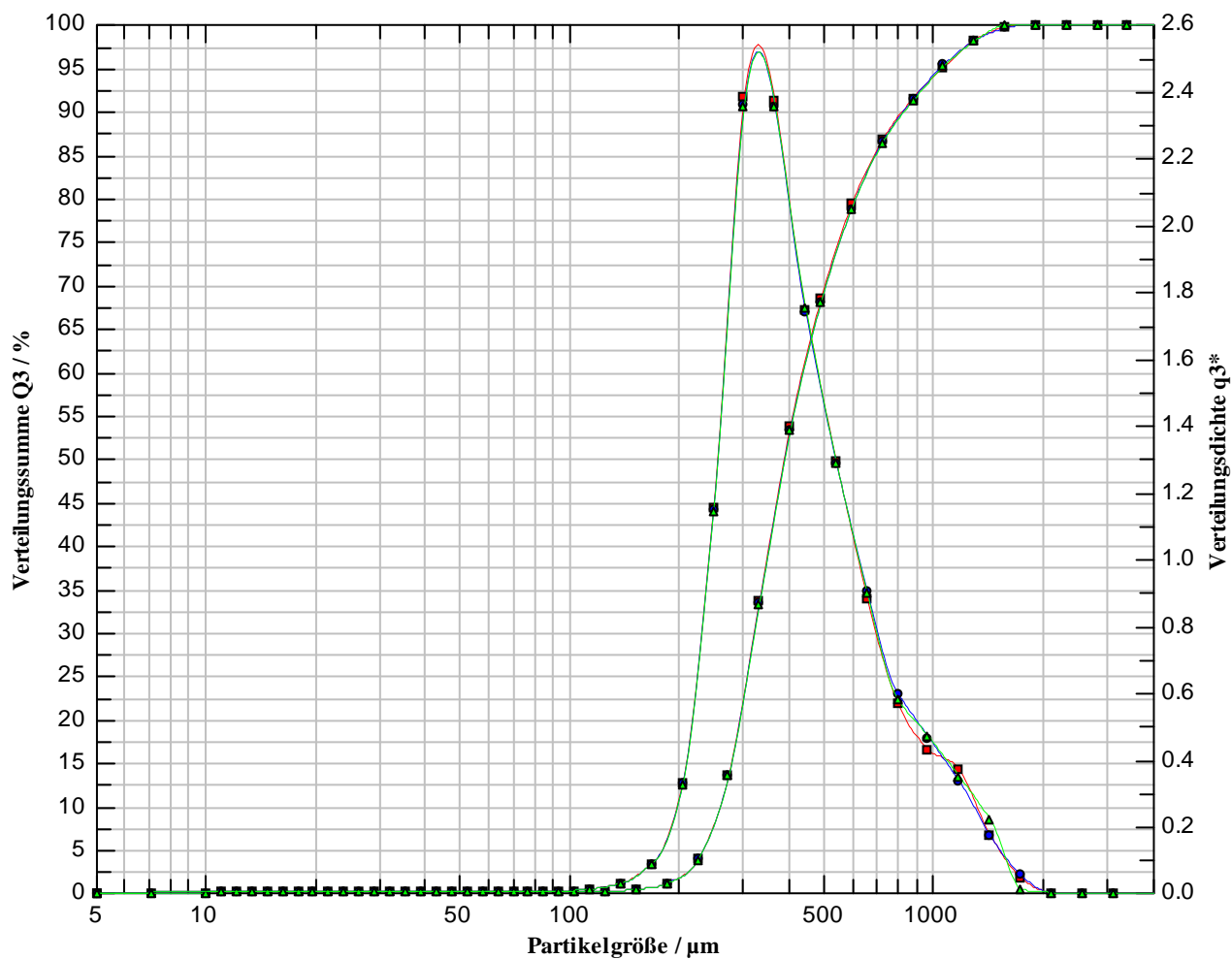
Einzelmessung Sand_M7_005

QICPIC (Q0108) & GRADIS, 1.00 63.0 mm - M7 (10...3410µm)

Produkt: Sand (TU-CLZ, Inst. f. Metallurgie)				Auswertung:			
Dichte: 1,00 g/cm ³ Probennummer: ---				Berechnungsmodus: EQPC (5.3.1.0) Partikelanzahl: 353230 Klassengrenzen: M7			
Messbedingung: 200Hz, oko0.01%, 10-999s				Dispergiermethode: 4x10, feed5%, gap2, nil			
Bildrate: 200 Hz Start: c.opt >= 0,01% Stopp: 10s c.opt <= 0,01% oder 999s Echtzeit Messdauer: 540,08 s opt. Konzentration: 0,2387 %				Dosierer: VIBRI Förderrate: 5,00 % Trichterhöhe: 2,00 mm Fallhöhe: 50,00 cm zus. Informationen: V-Rinne, Spalt 4*10			
Allgemeine Informationen				Kunde: TU-CL, Inst. f. Metallurgie			
Probenteilung: ja Probenmenge: 18 g				Messung: 2007-08-06 15:20:38.9900 0108 Q Bediener: Fei Datenbank: QICPIC JANUAR 2007			
Klassen- obergrenze x ₀ [µm]	Verteilungs- summe Q ₃ [%]	Rückstand (1-Q ₃) [%]	Fraktion dQ ₃ [%]	Klassen- mitte (lin) x _m [µm]	Verteilungs- dichte (lin) q ₃ [1/mm]	Klassen- mitte (log) x _m [µm]	Verteilungs- dichte (log) q ₃ *
10,00	0,00	100,00	0,00	7,50	0,00	7,07	0,00
12,15	0,00	100,00	0,00	11,07	0,00	11,02	0,00
14,75	0,00	100,00	0,00	13,45	0,00	13,39	0,00
17,92	0,00	100,00	0,00	16,33	0,00	16,26	0,00
21,76	0,00	100,00	0,00	19,84	0,00	19,75	0,00
26,43	0,00	100,00	0,00	24,10	0,00	23,98	0,00
32,10	0,00	100,00	0,00	29,27	0,00	29,13	0,00
38,99	0,00	100,00	0,00	35,55	0,00	35,38	0,00
47,36	0,00	100,00	0,00	43,18	0,00	42,97	0,00
57,52	0,01	99,99	0,00	52,44	0,00	52,19	0,00
69,86	0,01	99,99	0,00	63,69	0,00	63,39	0,00
84,86	0,02	99,98	0,01	77,36	0,01	77,00	0,00
103,06	0,05	99,95	0,03	93,96	0,01	93,52	0,00
125,18	0,13	99,87	0,08	114,12	0,04	113,58	0,01
152,04	0,35	99,65	0,22	138,61	0,08	137,96	0,03
184,66	1,07	98,93	0,72	168,35	0,22	167,56	0,08
224,29	3,78	96,22	2,71	204,47	0,68	203,51	0,32
272,41	13,39	86,61	9,62	248,35	2,00	247,18	1,14
330,87	33,24	66,76	19,85	301,64	3,40	300,22	2,35
401,86	53,14	46,86	19,89	366,36	2,80	364,64	2,36
488,09	67,90	32,10	14,77	444,98	1,71	442,88	1,75
592,83	78,77	21,23	10,87	540,46	1,04	537,92	1,29
720,03	86,33	13,67	7,56	656,43	0,59	653,34	0,90
874,54	91,20	8,80	4,86	797,29	0,31	793,53	0,58
1062,19	95,13	4,87	3,94	968,37	0,21	963,81	0,47
1290,12	98,06	1,94	2,93	1176,15	0,13	1170,62	0,35
1566,95	99,91	0,09	1,85	1428,53	0,07	1421,81	0,22
1903,18	100,00	0,00	0,09	1735,06	0,00	1726,90	0,01
2311,55	100,00	0,00	0,00	2107,37	0,00	2097,45	0,00
2807,56	100,00	0,00	0,00	2559,56	0,00	2547,51	0,00
3410,00	100,00	0,00	0,00	3108,78	0,00	3094,15	0,00
x₁₀ = 255,43 µm x₅₀ = 390,67 µm x₉₀ = 836,48 µm SMD = 387,44 µm VMD = 477,20 µm							
x₁₆ = 280,09 µm x₈₄ = 680,76 µm x₉₉ = 1430,50 µm							

Graphische Darstellung der Einzelmessungen

	Kennung	Dispergiersystem	Meßbereich	Partikelanzahl	Auswertung
■	Sand_M7_003	GRADIS	1.00 63.0 mm - M7 (10...3410µm)	353773	EQPC
●	Sand_M7_004	GRADIS	1.00 63.0 mm - M7 (10...3410µm)	346525	EQPC
▲	Sand_M7_005	GRADIS	1.00 63.0 mm - M7 (10...3410µm)	353230	EQPC



B Experimentelle Ergebnisse

Messung	Punkt	Mittelwert DMS1 in bar	Streuung DMS1 in %	Mittelwert LSW1 in V	Streuung LSW1 in %	Mittelwert DMS2 in bar	Streuung DMS2 in %	Mittelwert LSW2 in V	Streuung LSW2 in %
13	10	1,1	7	3,4	66	0,6	16	1,0	152
13	11	1,1	5	3,1	79	0,6	12	0,8	167
13	12	1,1	5	3,2	70	0,6	14	0,9	156
13	13	1,1	5	3,3	68	0,7	13	0,8	173
13	14	1,1	5	3,1	74	0,6	17	0,9	164
13	15	1,1	6	3,4	63	0,7	14	1,0	159
13	16	1,1	5	3,0	82	0,7	17	1,1	142
13	17	1,1	5	3,1	73	0,7	13	0,9	163
15	18	0,7	11	2,5	93	0,4	29	0,5	233
15	19	0,7	11	2,5	86	0,4	33	0,5	225
15	20	0,7	10	2,3	97	0,4	35	0,7	209
15	21	0,8	11	2,6	84	0,4	26	0,5	241
15	22	0,8	9	2,5	91	0,4	31	0,4	270
15	23	0,8	10	2,5	87	0,4	27	0,5	241
15	24	0,8	11	2,3	97	0,4	47	0,5	242
15	25	0,8	10	2,7	84	0,4	36	0,5	242
16	1	0,8	12	2,1	105	0,4	30	0,5	260
16	2	0,8	11	2,3	98	0,4	32	0,5	261
16	3	0,8	11	2,3	95	0,4	38	0,4	276
16	4	0,8	10	2,1	105	0,4	45	0,4	264
16	5	0,8	11	2,0	108	0,4	32	0,6	228
16	6	0,9	12	2,6	83	0,4	42	0,4	302
12	2	0,3	69	1,8	111	0,4	59	0,1	541
12	5	0,4	54	1,6	132	0,4	50	0,1	478
12	9	0,5	45	0,9	188	0,5	49	0,1	448
12	23	0,4	46	1,5	136	0,4	48	0,1	418
12	25	0,5	43	1,5	128	0,5	54	0,2	352
18	2	0,2	99	1,1	168	0,3	83	0,2	392
18	3	0,1	137	1,1	173	0,2	123	0,1	610
18	8	0,2	109	0,9	197	0,2	90	0,1	537
18	15	0,2	68	0,9	198	0,3	91	0,1	793
18	16	0,2	114	1,4	141	0,2	93	0,2	391

Tabelle B-1: Statistische Betrachtung ausgewählter Punktmessungen – Teil 1 DMS1, LSW1, DMS2 und LSW2

Messung	Punkt	Mittelwert MDM1 in NLP	Minimum MDM1 in NLP	Maximum MDM1 in NLP	Streuung MDM1 in %	Mittelwert MDM3 in NLP	Streuung MDM3 in %
13	10	20	17	23	9,2	24	0,3
13	11	20	17	23	7,7	24	0,3
13	12	20	17	23	7,8	24	0,3
13	13	20	16	22	8,3	24	0,3
13	14	19	16	23	8,5	24	0,3
13	15	20	16	24	8,7	24	0,3
13	16	20	15	24	10,4	24	0,3
13	17	21	18	23	6,4	24	0,3
15	18	28	24	30	5,9	36	0,4
15	19	28	24	31	6,3	36	0,3
15	20	28	25	31	5,1	36	0,4
15	21	28	24	30	5,1	36	0,4
15	22	28	25	30	5,8	36	0,3
15	23	28	25	30	5,1	36	0,3
15	24	28	21	31	9,2	36	0,5
15	25	28	24	32	7,1	35	0,3
16	1	41	37	44	4,3	54	0,6
16	2	41	36	44	4,3	54	0,6
16	3	41	37	46	6,4	54	0,5
16	4	43	39	48	6,0	54	0,6
16	5	42	38	45	3,7	54	0,6
16	6	41	35	50	8,5	54	0,3
12	2	58	49	63	6,9	69	0,3
12	5	56	45	63	9,1	69	0,4
12	9	56	48	66	8,5	69	0,4
12	23	56	47	65	8,9	69	0,4
12	25	57	43	69	11,1	69	0,5
18	2	145	99	198	18,1	175	0,5
18	3	162	125	200	12,7	174	0,6
18	8	156	113	205	17,6	174	0,5
18	15	146	103	198	19,6	174	0,4
18	16	163	116	204	14,5	174	0,6

Tabelle B-2: Statistische Betrachtung ausgewählter Punktmessungen – Teil 2 MDM1 und MDM3

Messung	Punkt	Förderzustand	$v_{0,1}$ in m/s	$\Delta p_{1/L}$ in Pa/m	Streuung $\Delta p_{1/L}$ in %	Gutmassenstrom in kg/s	Streuung Gutmassenstrom in %	Beladung
13	10	Ballen	1,838	10779	4,6	0,034	5,9	70
13	11	Ballen	1,818	10834	4,8	0,032	7,1	67
13	12	Ballen	1,834	10918	4,5	0,038	4,1	80
13	13	Ballen	1,854	11010	4,5	0,039	4,2	82
13	14	Ballen	1,814	11117	4,1	0,038	5,4	80
13	15	Ballen	1,802	11158	5,3	0,041	4,1	86
13	16	Ballen	1,740	11170	6,0	0,046	3,5	100
13	17	Ballen	1,782	11306	4,9	0,047	3,4	101
15	18	Ballen	2,863	9119	6,5	0,030	9,2	42
15	19	Ballen	2,857	9298	6,3	0,035	7,6	48
15	20	Ballen	2,797	9336	6,8	0,034	9,0	48
15	21	Ballen	2,815	9522	6,4	0,036	7,3	49
15	22	Ballen	2,759	9650	6,8	0,030	11,4	43
15	23	Ballen	2,708	9766	6,7	0,038	9,6	54
15	24	Ballen	2,760	9920	5,5	0,034	7,4	48
15	25	Ballen	2,699	9962	6,7	0,036	8,6	50
16	1	Ballen	3,825	9349	7,7	0,036	10,1	36
16	2	Ballen	3,836	9450	8,5	0,034	9,3	34
16	3	Ballen	3,732	9614	7,4	0,047	6,7	48
16	4	Ballen	3,692	9664	7,7	0,050	6,1	51
16	5	Ballen	3,710	9754	7,9	0,043	6,8	44
16	6	Ballen	3,745	9983	6,4	0,044	7,9	45
12	2	Übergang Ballen/Strähnen	5,923	7498	8,3	0,046	7,0	32
12	5	Übergang Ballen/Strähnen	5,775	7844	9,0	0,048	9,8	33
12	9	Übergang Ballen/Strähnen	5,680	8118	8,8	0,047	7,3	33
12	23	Übergang Ballen/Strähnen	5,726	7868	10,3	0,035	13,9	25
12	25	Übergang Ballen/Strähnen	5,701	8011	9,5	0,044	10,3	31
18	2	Strähnen	7,742	5465	13,4	0,040	7,8	22
18	3	Strähnen	7,896	5545	11,1	0,040	5,1	22
18	8	Strähnen	7,815	5684	10,4	0,033	10,6	18
18	15	Strähnen	7,571	5787	13,9	0,047	7,7	26
18	16	Strähnen	7,538	5799	12,2	0,043	6,3	24

Tabelle B-3: Statistische Betrachtung ausgewählter Punktmessungen – Teil 3

Gutmassenstrom kg/s	$\Delta p_{\text{f}}/\text{Lin Pa/m}$	Gasmaassenstrom in kg/s	$v_{0,1}$ in m/s	Beladung	Förderzustand	Messung
4,968E-02	9,664E+03	9,673E-04	3,692	51	Ballen	16
4,889E-02	9,651E+03	9,770E-04	3,708	50	Ballen	16
4,712E-02	1,131E+04	4,669E-04	1,980	101	Ballen	13
4,699E-02	9,614E+03	9,719E-04	3,732	49	Ballen	16
4,596E-02	1,117E+04	4,616E-04	1,740	100	Ballen	13
4,372E-02	9,983E+03	9,752E-04	3,744	45	Ballen	16
4,314E-02	1,022E+04	7,104E-04	2,692	61	Ballen	15
4,253E-02	9,754E+03	9,762E-04	3,710	43	Ballen	16
4,220E-02	1,070E+04	4,674E-04	1,805	90	Ballen	13
4,182E-02	1,006E+04	7,029E-04	2,714	60	Ballen	15
4,154E-02	1,001E+04	9,818E-04	3,721	42	Ballen	16
4,075E-02	1,116E+04	4,741E-04	1,802	86	Ballen	13
3,996E-02	1,013E+04	5,117E-04	2,174	70	Ballen	17
3,935E-02	1,101E+04	4,822E-04	1,854	82	Ballen	13
3,873E-02	9,568E+03	7,259E-04	2,816	53	Ballen	15
3,867E-02	1,049E+04	4,907E-04	1,880	79	Ballen	13
3,835E-02	1,092E+04	4,783E-04	1,834	80	Ballen	13
3,826E-02	9,766E+03	7,036E-04	2,708	54	Ballen	15
3,775E-02	1,004E+04	7,323E-04	2,810	52	Ballen	15
3,767E-02	1,112E+04	4,713E-04	1,814	80	Ballen	13
3,630E-02	9,953E+03	7,382E-04	2,843	49	Ballen	15
3,600E-02	9,349E+03	9,903E-04	3,824	36	Ballen	16
3,592E-02	9,769E+03	9,745E-04	3,693	37	Ballen	16
3,576E-02	9,522E+03	7,271E-04	2,815	49	Ballen	15
3,551E-02	9,962E+03	7,036E-04	2,699	50	Ballen	15
3,524E-02	1,063E+04	4,762E-04	1,838	74	Ballen	13
3,512E-02	9,298E+03	7,299E-04	2,857	48	Ballen	15
3,448E-02	9,920E+03	7,152E-04	2,760	48	Ballen	15

Tabelle B-4: FZD-Messungen der Fördergutmassenstromkategorien 0,03 bis <0,04 kg/s und 0,04 bis <0,05 kg/s – Teil 1

Gutmassenstrom kg/s	$\Delta p_1/L$ in Pa/m	Gasmassenstrom in kg/s	$v_{0,1}$ in m/s	Beladung	Förderzustand	Messung
3,434E-02	9,336E+03	7,214E-04	2,797	48	Ballen	15
3,405E-02	9,450E+03	1,001E-03	3,836	34	Ballen	16
3,370E-02	1,040E+04	4,880E-04	1,885	69	Ballen	14
3,355E-02	1,078E+04	4,771E-04	1,838	70	Ballen	13
3,314E-02	9,640E+03	9,728E-04	3,689	34	Ballen	16
3,275E-02	9,772E+03	4,823E-04	1,866	68	Ballen	13
3,250E-02	9,783E+03	7,416E-04	2,841	44	Ballen	15
3,244E-02	9,372E+03	1,008E-03	3,878	32	Ballen	16
3,232E-02	9,902E+03	7,380E-04	2,829	44	Ballen	15
3,194E-02	9,518E+03	7,324E-04	2,856	44	Ballen	15
3,172E-02	1,083E+04	4,753E-04	1,818	67	Ballen	13
3,136E-02	9,720E+03	7,440E-04	2,875	42	Ballen	15
3,062E-02	1,036E+04	4,889E-04	1,902	63	Ballen	14
3,048E-02	9,119E+03	7,331E-04	2,863	42	Ballen	15
3,040E-02	9,650E+03	7,145E-04	2,759	43	Ballen	15
4,910E-02	5,923E+03	1,556E-03	6,524	32	Übergang Ballen/Strähnen	19
4,767E-02	7,844E+03	1,433E-03	5,775	33	Übergang Ballen/Strähnen	12
4,714E-02	8,118E+03	1,428E-03	5,680	33	Übergang Ballen/Strähnen	12
4,557E-02	7,498E+03	1,444E-03	5,923	32	Übergang Ballen/Strähnen	12
4,422E-02	8,011E+03	1,428E-03	5,701	31	Übergang Ballen/Strähnen	12
3,521E-02	7,868E+03	1,432E-03	5,726	25	Übergang Ballen/Strähnen	12
4,712E-02	5,787E+03	1,810E-03	7,570	26	Strähnen	18
4,659E-02	5,750E+03	1,816E-03	7,774	26	Strähnen	18
4,479E-02	5,749E+03	1,830E-03	7,790	25	Strähnen	18
4,324E-02	5,799E+03	1,778E-03	7,538	25	Strähnen	18
4,040E-02	5,465E+03	1,833E-03	7,742	22	Strähnen	18
4,024E-02	5,545E+03	1,833E-03	7,896	22	Strähnen	18
3,298E-02	5,684E+03	1,825E-03	7,816	18	Strähnen	18

Tabelle B-5: FZD-Messungen der Fördergutmassenstromkategorien 0,03 bis <0,04 kg/s und 0,04 bis <0,05 kg/s – Teil 2

Gutmassenstrom in kg/s	Beladung	$v_{0,1}$ in m/s	Δp_1 /L in bar/m	Förderzustand	Messung
0,0711	77	3,51	0,0993	Ballen	16
0,0547	57	3,67	0,0980	Ballen	16
0,0534	55	3,68	0,0997	Ballen	16
0,0500	50	3,82	0,0937	Ballen	16
0,0497	51	3,69	0,0966	Ballen	16
0,0489	50	3,71	0,0965	Ballen	16
0,0471	101	1,98	0,1131	Ballen	13
0,0470	49	3,73	0,0961	Ballen	16
0,0460	100	1,74	0,1117	Ballen	13
0,0437	45	3,74	0,0998	Ballen	16
0,0431	61	2,69	0,1022	Ballen	15
0,0425	43	3,71	0,0975	Ballen	16
0,0422	90	1,81	0,1070	Ballen	13
0,0418	60	2,71	0,1006	Ballen	15
0,0415	42	3,72	0,1001	Ballen	16
0,0408	86	1,80	0,1116	Ballen	13
0,0400	70	2,17	0,1013	Ballen	17
0,0394	82	1,85	0,1101	Ballen	13
0,0387	53	2,82	0,0957	Ballen	15
0,0387	79	1,88	0,1049	Ballen	13
0,0384	80	1,83	0,1092	Ballen	13
0,0383	54	2,71	0,0977	Ballen	15
0,0378	52	2,81	0,1004	Ballen	15
0,0377	80	1,81	0,1112	Ballen	13
0,0363	49	2,84	0,0995	Ballen	15
0,0360	36	3,82	0,0935	Ballen	16
0,0359	37	3,69	0,0977	Ballen	16
0,0358	49	2,82	0,0952	Ballen	15
0,0355	50	2,70	0,0996	Ballen	15
0,0352	74	1,84	0,1063	Ballen	13
0,0351	48	2,86	0,0930	Ballen	15
0,0345	48	2,76	0,0992	Ballen	15
0,0343	48	2,80	0,0934	Ballen	15
0,0341	34	3,84	0,0945	Ballen	16
0,0337	69	1,89	0,1040	Ballen	14
0,0336	70	1,84	0,1078	Ballen	13
0,0331	34	3,69	0,0964	Ballen	16
0,0328	68	1,87	0,0977	Ballen	13
0,0325	44	2,84	0,0978	Ballen	15
0,0324	32	3,88	0,0937	Ballen	16
0,0323	44	2,83	0,0990	Ballen	15
0,0319	44	2,86	0,0952	Ballen	15
0,0317	67	1,82	0,1083	Ballen	13
0,0314	42	2,88	0,0972	Ballen	15

Tabelle B-6: FZD-Punktmessungen – Ballenförderung Teil 1

Gutmassenstrom in kg/s	Beladung	$v_{0,1}$ in m/s	Δp_l /L in bar/m	Förderzustand	Messung
0,0306	63	1,90	0,1036	Ballen	14
0,0305	42	2,86	0,0912	Ballen	15
0,0304	43	2,76	0,0965	Ballen	15
0,0292	58	1,98	0,1020	Ballen	13
0,0291	40	2,80	0,1017	Ballen	15
0,0290	58	1,93	0,1026	Ballen	13
0,0285	58	1,93	0,1028	Ballen	14
0,0282	57	1,95	0,0985	Ballen	14
0,0281	57	1,92	0,1049	Ballen	13
0,0280	57	1,93	0,1009	Ballen	14
0,0276	56	1,92	0,1003	Ballen	14
0,0275	27	4,01	0,0909	Ballen	16
0,0273	37	2,87	0,0982	Ballen	15
0,0270	46	2,27	0,1002	Ballen	17
0,0255	34	2,93	0,0943	Ballen	15
0,0255	34	2,97	0,0922	Ballen	15
0,0254	34	2,86	0,0963	Ballen	15
0,0250	52	1,86	0,1027	Ballen	14
0,0245	25	3,68	0,0982	Ballen	16
0,0237	47	1,94	0,1017	Ballen	14
0,0233	23	3,74	0,0952	Ballen	16
0,0233	46	1,98	0,1016	Ballen	14
0,0229	23	3,86	0,0945	Ballen	16
0,0226	45	1,97	0,0998	Ballen	14
0,0220	36	2,36	0,0951	Ballen	17
0,0217	43	1,96	0,0994	Ballen	13
0,0215	21	3,98	0,0900	Ballen	16
0,0215	42	2,03	0,0962	Ballen	14
0,0214	36	2,28	0,0969	Ballen	17
0,0199	39	1,97	0,0974	Ballen	14
0,0195	38	2,00	0,1000	Ballen	14
0,0191	38	1,99	0,0997	Ballen	14
0,0185	36	1,97	0,1028	Ballen	14
0,0184	37	1,95	0,1042	Ballen	13
0,0184	18	3,90	0,0922	Ballen	16
0,0180	34	2,05	0,0987	Ballen	14
0,0177	23	3,01	0,0908	Ballen	15
0,0176	29	2,33	0,0992	Ballen	17
0,0175	34	2,03	0,0945	Ballen	14
0,0166	28	2,36	0,0932	Ballen	17
0,0160	30	2,08	0,0939	Ballen	14
0,0153	30	1,99	0,0950	Ballen	14
0,0130	25	2,03	0,0967	Ballen	14
0,0101	19	2,10	0,0924	Ballen	14

Tabelle B-7: FZD-Punktmessungen – Ballenförderung Teil 2

Gutmassenstrom in kg/s	Beladung	$v_{0,i}$ in m/s	$\Delta p_i/L$ in bar/m	Förderzustand	Messung
0,0961	70	5,59	0,0783	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0921	84	4,21	0,0999	Übergang Ballen/Strähnen	17
0,0863	63	5,49	0,0796	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0852	75	4,36	0,0961	Übergang Ballen/Strähnen	17
0,0849	76	4,32	0,0982	Übergang Ballen/Strähnen	17
0,0825	59	5,69	0,0803	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0808	58	5,61	0,0786	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0754	54	5,62	0,0821	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0744	53	5,60	0,0807	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0741	61	4,71	0,0941	Übergang Ballen/Strähnen	17
0,0738	62	4,57	0,0947	Übergang Ballen/Strähnen	17
0,0726	51	5,69	0,0782	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0724	48	6,45	0,0602	Übergang Ballen/Strähnen	19
0,0718	51	5,57	0,0813	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0717	51	5,51	0,0811	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0691	56	4,89	0,0882	Übergang Ballen/Strähnen	17
0,0687	49	5,60	0,0808	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0647	46	5,65	0,0820	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0638	45	5,76	0,0758	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0620	49	4,94	0,0898	Übergang Ballen/Strähnen	17
0,0620	41	6,38	0,0629	Übergang Ballen/Strähnen	19
0,0610	41	6,26	0,0612	Übergang Ballen/Strähnen	19
0,0602	40	6,32	0,0623	Übergang Ballen/Strähnen	19
0,0587	41	5,62	0,0824	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0583	41	5,72	0,0811	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0562	40	5,73	0,0770	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0561	44	4,99	0,0906	Übergang Ballen/Strähnen	17
0,0542	38	5,77	0,0802	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0542	38	5,92	0,0764	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0536	44	4,74	0,0903	Übergang Ballen/Strähnen	17
0,0518	36	5,75	0,0785	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0516	36	5,64	0,0823	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0510	36	5,82	0,0774	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0509	36	5,80	0,0762	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0491	32	6,52	0,0592	Übergang Ballen/Strähnen	19
0,0477	33	5,78	0,0784	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0471	33	5,68	0,0812	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0456	32	5,92	0,0750	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0442	31	5,70	0,0801	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0352	25	5,73	0,0787	Übergang Ballen/Strähnen	12
0,0299	21	5,61	0,0786	Übergang Ballen/Strähnen	12

Tabelle B-8: FZD-Punktmessungen – Übergang Ballen-/Strähnenförderung

Gutmassenstrom in kg/s	Beladung	$v_{0,1}$ in m/s	Δp_l /L in bar/m	Förderzustand	Messung
0,0702	40	7,65	0,0556	Strähnen	18
0,0631	36	7,54	0,0579	Strähnen	18
0,0593	33	7,64	0,0568	Strähnen	18
0,0570	32	7,62	0,0575	Strähnen	18
0,0471	26	7,57	0,0579	Strähnen	18
0,0466	26	7,77	0,0575	Strähnen	18
0,0448	25	7,79	0,0575	Strähnen	18
0,0432	25	7,54	0,0580	Strähnen	18
0,0404	22	7,74	0,0546	Strähnen	18
0,0402	22	7,90	0,0554	Strähnen	18
0,0330	18	7,82	0,0568	Strähnen	18
0,0280	16	7,78	0,0580	Strähnen	18
0,0201	11	7,88	0,0583	Strähnen	18
0,0165	9	8,02	0,0590	Strähnen	18

Tabelle B-9: FZD-Punktmessungen – Strähnenförderung

Messung	Flanke	Punkt	Modellrechn.	Förderzustand	Gutmassenstrom in kg/s	Beladung	$v_{0,1}$ in m/s	$\Delta p_v/L$ in (N/m ²)/m	p_a in N/m ²	p_e in N/m ²
12	3	17	5	Übergang Ballen/Strähnen	0,08626	63	5,487	7960	269606,22	110486,36
17	4	22	5	Übergang Ballen/Strähnen	0,0852	75,2	4,355	9610	303775,47	111642,3
17	4	21	5	Übergang Ballen/Strähnen	0,08493	75,6	4,315	9820	307770,81	111350,79
12	4	26	5	Übergang Ballen/Strähnen	0,0825	59	5,685	8030	269756,64	109214,64
12	4	24	5	Übergang Ballen/Strähnen	0,08075	58	5,606	7860	267735,72	110500,93
17	4	24	4	Übergang Ballen/Strähnen	0,07409	61,2	4,705	9410	298647,07	110525,45
17	4	23	4	Übergang Ballen/Strähnen	0,07382	62,4	4,57	9470	300790,13	111416,38
12	2	7	4	Übergang Ballen/Strähnen	0,07259	51	5,685	7820	267093,08	110630,28
19	1	4	4	Übergang Ballen/Strähnen	0,07235	47,5	6,448	6020	229704,52	109335,73
12	4	27	4	Übergang Ballen/Strähnen	0,07184	51	5,573	8130	272859,56	110326,02
12	3	20	3	Übergang Ballen/Strähnen	0,06865	49	5,598	8080	272422,01	110814,3
12	3	13	3	Übergang Ballen/Strähnen	0,06379	45	5,76	7580	261907,25	110213,98
17	1	5	3	Übergang Ballen/Strähnen	0,06198	49,2	4,94	8980	289915,31	110341,44
19	1	2	3	Übergang Ballen/Strähnen	0,06198	41	6,382	6290	234277,78	108431,15
19	1	1	3	Übergang Ballen/Strähnen	0,06017	40	6,316	6230	235101,82	110425,25
12	4	30	2	Übergang Ballen/Strähnen	0,05867	41	5,623	8240	276491,18	111730,74
12	3	14	2	Übergang Ballen/Strähnen	0,05621	40	5,733	7700	264108,65	110148,38
17	1	4	2	Übergang Ballen/Strähnen	0,05613	44,4	4,99	9060	290819,57	109645,46
12	2	3	2	Übergang Ballen/Strähnen	0,05416	38	5,92	7640	260048,6	107249,69
17	1	3	2	Übergang Ballen/Strähnen	0,05361	44	4,7425	9030	291800,4	111174,97
19	1	5	1	Übergang Ballen/Strähnen	0,0491	31,5	6,524	5920	229526,76	111073,85
12	2	5	1	Übergang Ballen/Strähnen	0,04767	33	5,775	7840	266813,23	109940,69
12	2	9	1	Übergang Ballen/Strähnen	0,04714	33	5,68	8120	273272,49	110909,96
12	2	2	1	Übergang Ballen/Strähnen	0,04557	32	5,923	7500	258527,22	108576,97
12	4	25	1	Übergang Ballen/Strähnen	0,04422	31	5,701	8010	270931,63	110704,08

Tabelle B-10: Ausgewählte Punktmessungen für Modellrechnungen – Teil 1

Messung	Flanke	Punkt	Modellrechn.	$\rho_{\text{Luft, oben}}$ in kg/m^3	$\rho_{\text{Luft, unten}}$ in kg/m^3	$V_{\text{Gas, oben}}$ in m^3/s	U_{LSW1} in V
12	3	17	5	1,3265	3,237	7,78	1,69481603
17	4	22	5	1,3404	3,6472	6,375	2,57810388
17	4	21	5	1,3369	3,6952	6,325	2,25454618
12	4	26	5	1,3113	3,2388	8,09	2,17762489
12	4	24	5	1,3267	3,2145	7,94	1,98281214
17	4	24	4	1,327	3,5856	6,875	2,43312238
17	4	23	4	1,3377	3,6114	6,675	2,44519403
12	2	7	4	1,3283	3,2068	8,04	1,8240745
19	1	4	4	1,3127	2,7579	8,74	1,42476169
12	4	27	4	1,3246	3,276	7,94	1,87251382
12	3	20	3	1,3305	3,2708	7,96	1,89119963
12	3	13	3	1,3233	3,1445	8,11	1,45202711
17	1	5	3	1,3248	3,4808	7,15	2,24432266
19	1	2	3	1,3019	2,8128	8,72	1,44183586
19	1	1	3	1,3258	2,8227	8,6	1,27510138
12	4	30	2	1,3415	3,3196	8,01	1,4774719
12	3	14	2	1,3225	3,171	8,09	1,91531243
17	1	4	2	1,3164	3,4917	7,25	3,39307833
12	2	3	2	1,2877	3,1222	8,38	1,49196961
17	1	3	2	1,3348	3,5034	6,875	2,71036391
19	1	5	1	1,3336	2,7558	8,8	0,99073992
12	2	5	1	1,32	3,2034	8,18	1,57352445
12	2	9	1	1,3316	3,281	8,08	0,91605568
12	2	2	1	1,3036	3,1039	8,34	1,7711555
12	4	25	1	1,3291	3,2529	8,1	1,48242474

Tabelle B-11: Ausgewählte Punktmessungen für Modellrechnungen – Teil 2